



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316.1

**А. А. ЛЯШКОВ
Д. С. ОСИПОВ
Д. С. САТПАЕВ
Н. Н. ДОЛГИХ
А. Я. БИГУН**

Омский государственный
технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ- ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ЧАСТОТНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В статье описан способ идентификации однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью по гармоническому составу токов нулевой последовательности. Предложен метод дискретного вейвлет-преобразования для определения достоверных сведений об уровне высших гармоник во время переходного процесса, возникающего при однофазном замыкании на землю.

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю, высшие гармоники, ток нулевой последовательности, вейвлет-преобразование, изолированная нейтраль, линии электропередачи.

Токи и напряжения нулевой последовательности используются в качестве основных параметров режима электроэнергетической системы для идентификации однофазного замыкания на землю (ОЗ). В симметричных режимах работы системы,

в том числе при трехфазном коротком замыкании (КЗ), а также при междуфазных коротких замыканиях токи нулевой последовательности не имеют путей для протекания. По фазам трехфазной сети в нормальном режиме протекают токи как

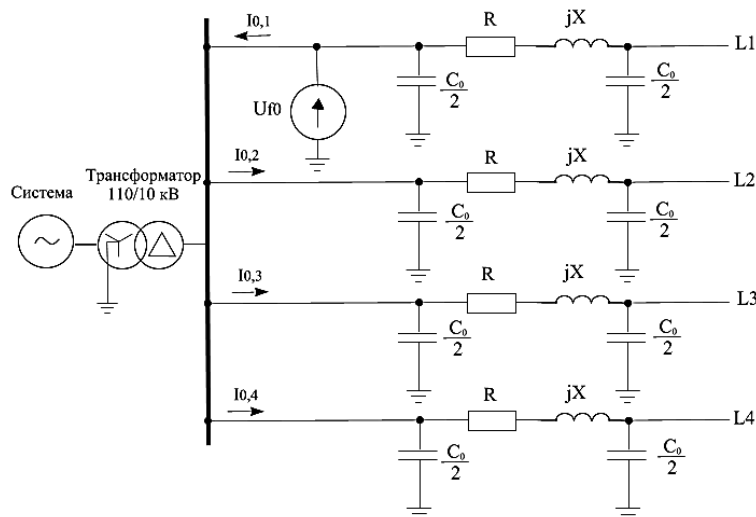


Рис. 1. Сеть с изолированной нейтралью

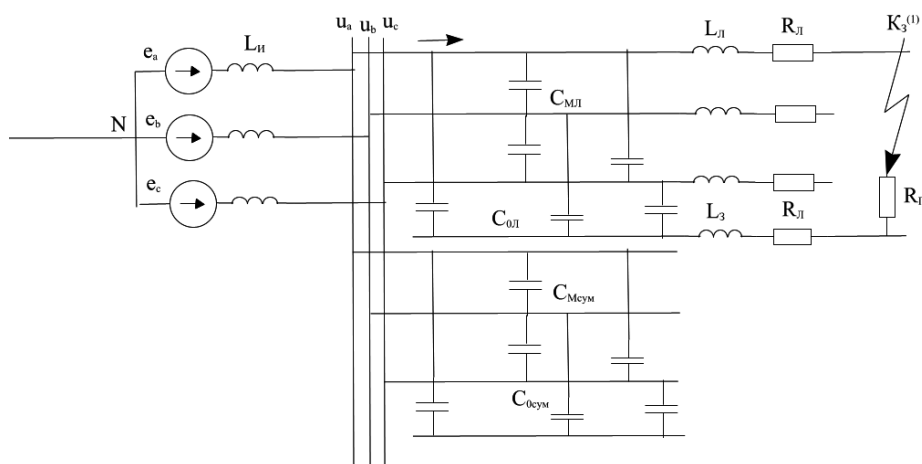


Рис. 2. Комплексная схема замещения

нагрузки, так и токи, обусловленные емкостями фаз относительно земли. В сетях с изолированной нейтралью 2–6 % от всех емкостных токов составляют токи, обусловленные активными проводимостями фаз сети на землю.

В качестве защит от ОЗЗ применяются устройства, основанные на использовании высших гармоник в токах нулевой последовательности. Необходимо отметить, что высшие гармоники присутствуют в сигнале тока нулевой последовательности как в установившемся режиме, так и при переходном процессе [1].

Спектральный состав и значения высших гармоник в токе ОЗЗ определяются главным образом характерными особенностями системы электроснабжения (количеством и типом нагрузок, искажающих синусоидальность формы кривой напряжения и тока; режимами работы нагрузок). В результате с достаточной степенью точности выбрать уставки срабатывания релейной защиты, а следовательно, и оценить чувствительность для устройств абсолютного замера по уровням высших гармоник представляется весьма затруднительной задачей. На первоначальном этапе уставки сра-

батывания таких защит определяют приблизительно и уточняют в процессе эксплуатации защиты.

Для достаточно точного решения переходного процесса при ОЗЗ используется двухчастотная схема, которая учитывает как принужденную составляющую промышленной частоты, так и наличие в токах и напряжениях двух основных свободных составляющих. Первая из них является разрядной составляющей, которая связана с разрядом емкостей поврежденной фазы, а вторая связана с дополнительным подзарядом емкостей неповрежденных фаз [2].

Используя метод симметричных составляющих, из схемы на рис. 1 можно получить комплексные схемы замещения (рис. 2) для расчета переходного тока и напряжения нулевой последовательности при ОЗЗ. Ток нулевой последовательности может быть определен как

$$\begin{aligned}
 3i_0 &= -3C_1 du_0 / dt = i_{np} + i_3 + i_p = \\
 &= 3C_{0\Sigma} U_m \cos(\omega t + \varphi) + I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + \\
 &\quad + I_{m3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3);
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

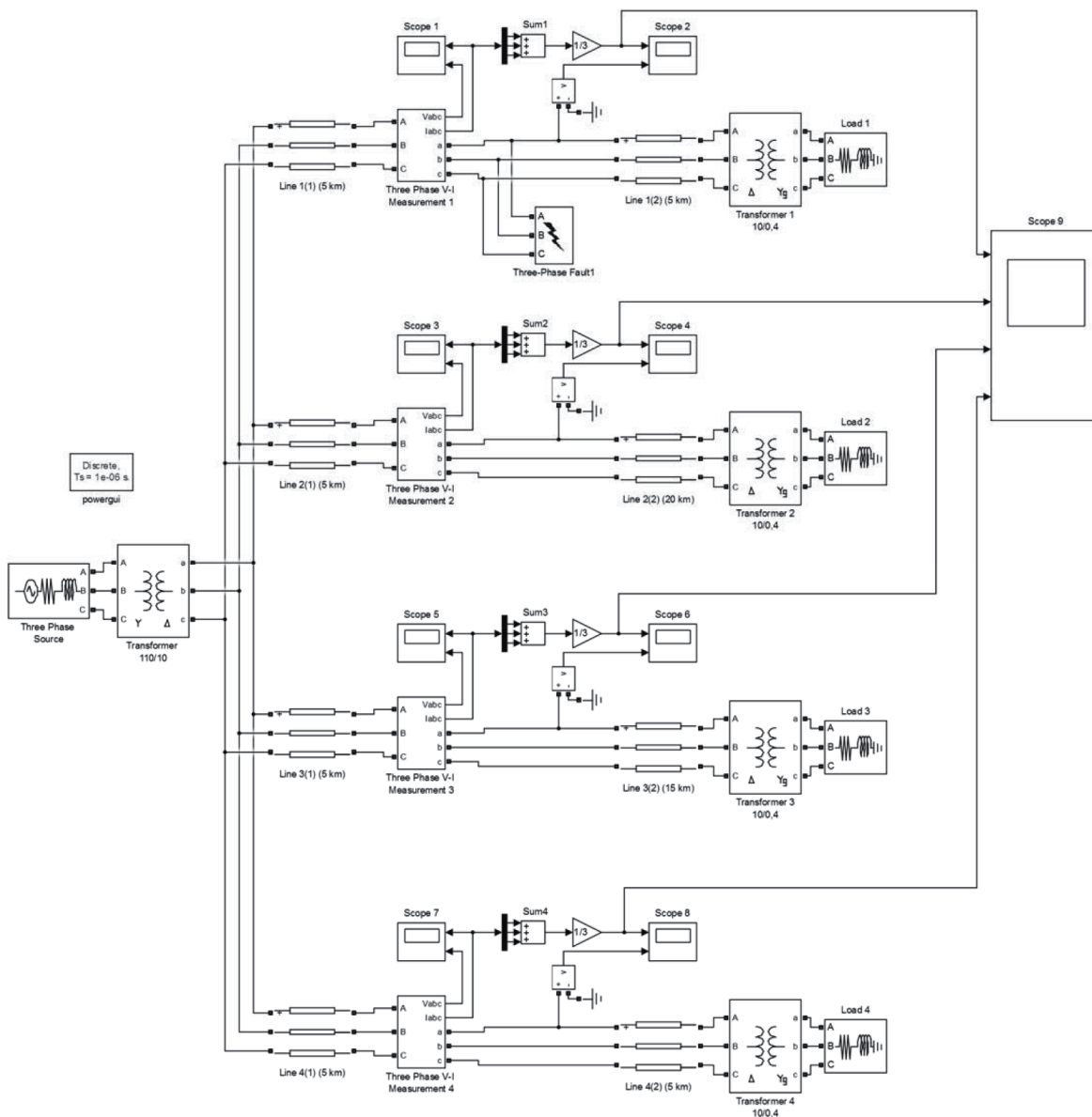
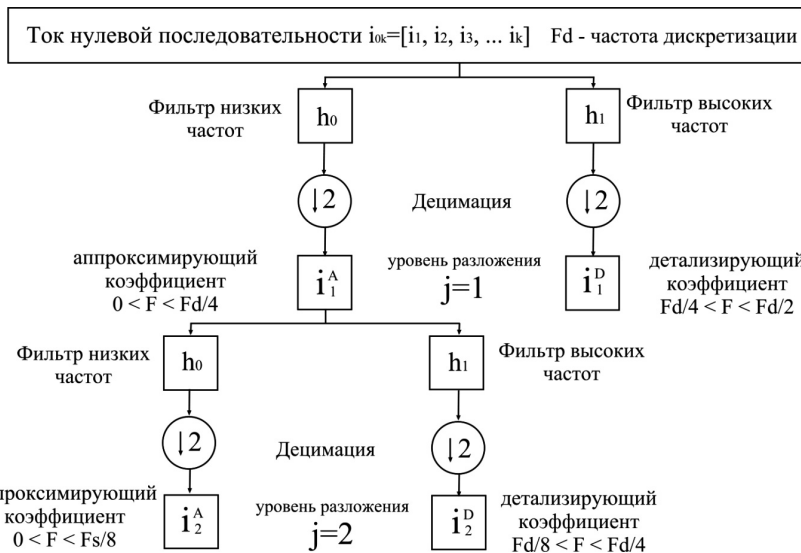


Рис. 4. Имитационная модель исследуемой системы

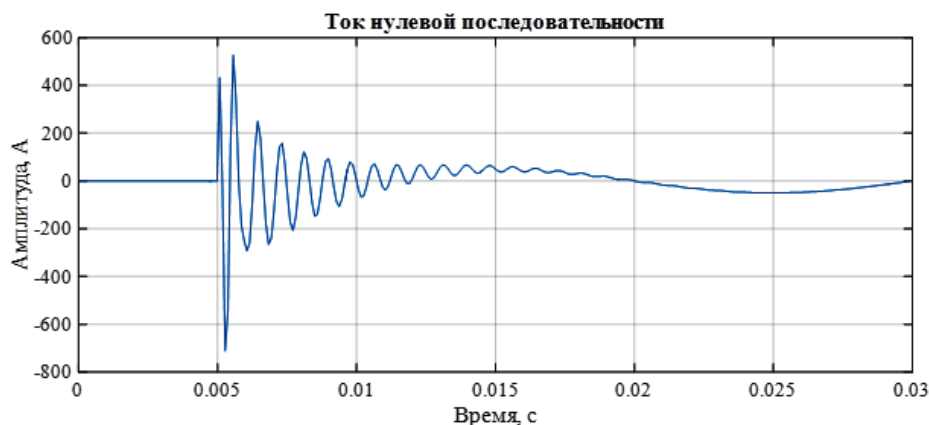


Рис. 5. Переходный процесс при замыкании фазы на землю

где ω_p — частота разрядных колебаний;
 ω_3 — частота зарядных колебаний;
 δ_p — постоянная затухания разрядных колебаний;
 δ_3 — постоянная затухания зарядных колебаний;
 U_m — амплитуда составляющей напряжения промышленной частоты на поврежденной фазе.

Частота разрядной составляющей $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$ определяется типом (воздушная или кабельная) и длиной ЛЭП, а также удалением точки простого замыкания на землю от шин защищаемого объекта. Величина разрядной составляющей находится в диапазоне от нескольких единиц до сотен килогерц. Разрядные составляющие затухают в течение нескольких сотен микросекунд.

Частота зарядной составляющей $f_3 = \frac{\omega_3}{2\pi}$ зависит в основном от суммарного емкостного тока сети и индуктивности источника питания и лежит обычно в пределах от нескольких сотен герц до нескольких килогерц. Зарядная составляющая затухает в течение 3–5 миллисекунд.

Таким образом, достаточно точно может быть обеспечена идентификация ОЗЗ по гармоническому составу токов нулевой последовательности.

Для построения защит по уровню высших гармоник в сетях с изолированной нейтралью существует два подхода.

Первый — защита абсолютного замера, который основан на сравнении измерения уровня высших гармоник в токе $3I_0$ защищаемого присоединения с заданным порогом чувствительности. Второй — токовая защита относительного замера, которая, в свою очередь, основана на сравнении уровней высших гармоник в токах нулевой последовательности на всех отходящих линиях защищаемого объекта [3].

Для эффективного использования данного подхода необходимо иметь достоверные сведения о частоте сигнала (уровне высших гармоник) во время переходного процесса.

Анализируя распределение энергии между гармоническими составляющими в спектре переходного тока, можно определить полосу частот, в которой сосредоточена основная часть энергии. Распределение энергии в спектре непериодического колебания определяется равенством Парсеваля. Применение преобразования Фурье затруднено необходимостью подбора ширины окна. В зависимости от ширины окна может меняться динамический спектр высших гармоник.

Для решения задачи частотной декомпозиции исследуемого сигнала может быть применен метод вейвлет-преобразования. В электроэнергетических системах вейвлет-анализ главным образом используется в таких областях, как определение поврежденной фазы заданной цепи, наблюдения в реальном времени и сжатия данных и обнаружения гармоник. В [4] представлен обширный библиографический обзор применений вейвлет-преобразований в измерении и анализе гармонического искажения в энергосистемах, обсуждение исполнения различных методов, предложенных в технической литературе.

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала — это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций, сконструированных из материнского (исходного) вейвлета $\Psi_{00}(t)$, обладающего свойствами хорошей локализации по времени за счет операций сдвига во времени k и изменения временного масштаба 2^j [2]:

$$\Psi_{jk}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \Psi_{00}(2^j t - k). \quad (2)$$

Преобразование, основой которого является степень двойки, называется диадным вейвлет-преобразованием. Для диадного преобразования разработан быстрый (пирамидальный) алгоритм вычислений (рис. 3), аналогичный быстрому преобразованию Фурье, что предопределило его широкое использование при анализе массивов цифровых данных [5].

Для численного эксперимента в среде Matlab Simulink была сформирована имитационная модель (рис. 4).

Параметры схемы замещения заданы следующими величинами. Сопротивления ЛЭП прямой последовательности $R_1=0,45$ Ом/км, $L_1=0,9337 \cdot 10^{-3}$ Гн/км, $C_1=71,74 \cdot 10^{-9}$ Ф/км; сопротивления нулевой последовательности $R_0=0,74$ Ом/км, $L_0=4,2146 \cdot 10^{-3}$ Гн/км, $C_1=47,9 \cdot 10^{-9}$ Ф/км; коэффициент трансформации 110/10 кВ, комплексное сопротивление трансформатора $Z_T=0,5685+j0,4033$. Длины линий $l_1=5$ км, $l_2=20$ км, $l_3=15$ км, $l_4=5$ км.

В разработанной модели замыкание фазы на землю на ЛЭП L_1 происходит за 0,005 секунды после начала моделирования. Осциллограмма переходного процесса тока нулевой последовательности представлена на рис. 5.

Частотная декомпозиция сигнала тока нулевой последовательности может быть выполнена

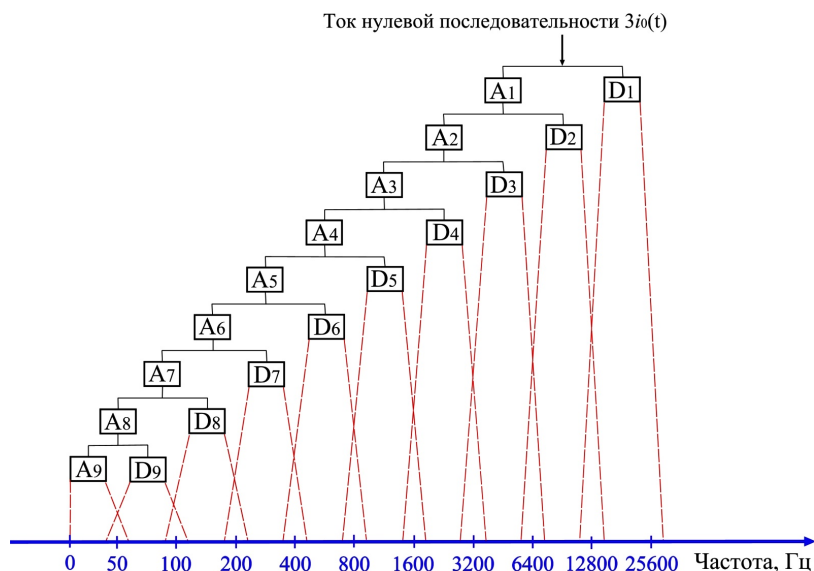


Рис. 6. Частотные диапазоны, определяемые каждым вейвлет-коэффициентом

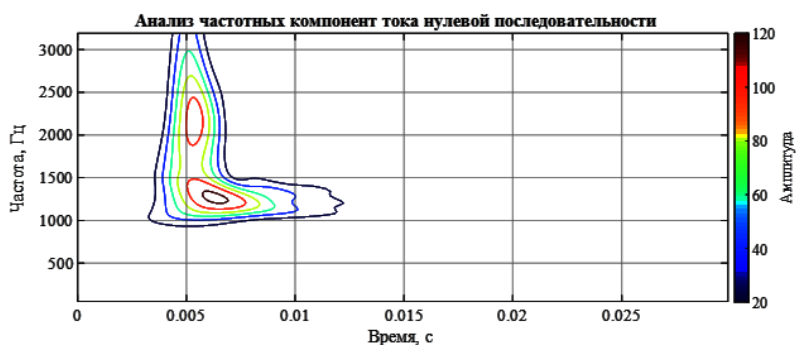


Рис. 7. Идентификация высокочастотных составляющих в сигнале тока

с применением дискретного вейвлет-преобразования (ДВП).

Фиксированное количество коэффициентов $h_0(k)$ и $h_1(k)$ связывают масштабирующую функцию и вейвлет одного разрешения с масштабирующей функцией на следующем, более низком разрешении:

$$\varphi(t) = \sum_k h_0(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k), \quad (3)$$

$$\psi(t) = \sum_k h_1(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k). \quad (4)$$

Для вейвлета Хаара коэффициенты фильтра $h_0(k)$ и $h_1(k)$ могут быть определены как

$$h_0(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$h_1(k) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Как показано в [6], выбор типа вейвлета в значительной мере определяет точность разложения электрических сигналов. В основе ДВП лежит рекурсивный алгоритм, когда каждый последующий вейвлет-коэффициент более глубокого уровня разложения определяется путем свертки предыдущего

уровня и коэффициента фильтра совместно с процедурой децимации (рис. 3):

$$\begin{cases} i_j^A = \sum_k h_0(2t - k) i_{j-1}^A \\ i_j^D = \sum_k h_1(2t - k) i_{j-1}^A \end{cases}. \quad (7)$$

Основываясь на аналитическом расчете, представленном в [2, 3], применяя теорему Котельникова, определяем частоту дискретизации для тока нулевой последовательности:

$$F_d \geq F_m, \quad (8)$$

где F_m — максимальная частота сигнала, Гц.

По условию (8) принимаем частоту дискретизации $F_d = 51,2$ кГц.

При данной частоте дискретизации можно определить частотные полосы, определяемые вейвлет-коэффициентами (рис. 6):

$$\sum_{n=1}^N [i_0(t)]^2 = \sum_{n=1}^N (i_n^A)^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N (i_n^D)^2, \quad (9)$$

где $i_0(t)$ — исследуемый ток нулевой последовательности;

N — количество вейвлет-коэффициентов на заданном уровне разложения j ;

i_n^A, i_n^D — аппроксимирующие и детализирующие вейвлет-коэффициенты.

Сумма квадратов вейвлет-коэффициентов определяет энергию заданного частотного диапазона, что наиболее наглядно иллюстрирует так называемая скалограмма (рис. 7), определяющая вклад каждой частотной компоненты в исследуемый сигнал тока.

Результатом исследования стала идентификация двух частотных компонент переходного процесса тока нулевой последовательности при замыкании фазы на землю в сетях с изолированной нейтралью. Как следует из скалограммы (рис. 7), в токе в момент замыкания появляются две дополнительные частоты (1300 и 2100 Гц). Отличие предлагаемой методики от широко применяемого для решения данных задач оконного преобразования Фурье заключается в отсутствии необходимости задавать ширину окна при частотном анализе сигналов. Применение вейвлет-анализа в предлагаемом методе для определения энергии сигнала позволит избежать ошибок в определении энергии сигнала по частотным диапазонам.

Выбор частоты дискретизации позволяет акцентировать внимание на зарядную и разрядные частоты, наиболее точно идентифицирующие факт замыкания на землю. Устранение граничного эффекта позволяет реализовать алгоритм для работы в режиме реального времени.

Библиографический список

1. Шуин, В. А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ / В. А. Шуин, А. В. Гусенков // Энергетик : прил. к журн. — М. : НТФ «Энергопрогресс», 2001. — № 11 (35). — 102 с.
2. Особенности использования электрических величин переходного процесса в защитах от замыканий на землю электрических сетей 6–10 кВ / В. А. Шуин [и др.] // Вестник Ивановского гос. энергет. ун-та. — 2011. — № 1. — С. 32–41.

3. Добраягина, О. А. Исследование и разработка методов и средств повышения динамической устойчивости функционирования токовых защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Добраягина Ольга Александровна. — Иваново, 2012. — 176 с.

4. Мисриханов, А. М. Применение методов вейвлет-преобразования в электроэнергетике / А. М. Мисриханов // Автоматика и телемеханика. — 2006. — № 5. — С. 5–23.

5. Вейвлет-анализ в примерах : учеб. пособие / О. В. Нагорнов [и др.]. — М. : НИЯУ МИФИ, 2010. — 120 с.

6. Определение коэффициентов искажения синусоидальности формы кривой тока по вейвлет-коэффициентам / Н. Н. Долгих [и др.] // Политематический сетевой электрон. науч. журн. Кубанского гос. аграр. ун-та. — 2015. — № 113. — С. 814–825.

ЛЯШКОВ Алексей Ануфриевич, доктор технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры инженерной геометрии и САПР.

Адрес для переписки: 3dogibmod@mail.ru

ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Адрес для переписки: ossipovdmitriy@list.ru

САТПАЕВ Дмитрий Сергеевич, аспирант, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

ДОЛГИХ Надежда Николаевна, аспирантка кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

БИГУН Александр Ярославович, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Адрес для переписки: barsbigun@list.ru

Статья поступила в редакцию 13.04.2016 г.

© А. А. Ляшков, Д. С. Осипов, Д. С. Сатпаев, Н. Н. Долгих, А. Я. Бигун

Книжная полка

621.311/В99

Вязигин, В. А. Вероятностно-статистические методы в энергетике : конспект лекций / В. А. Вязигин. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).

Изложен материал лекций, читаемых в Омском государственном техническом университете студентам 3-го курса специальности «Электроснабжение». В конспект вошли разделы, посвященные изучению случайных событий, способов задания законов распределения и характеристик случайных величин. Рассматриваются вопросы расчета надежности простейших логических схем, нахождения характеристик статистических распределений. Конспект лекций предназначен в первую очередь для дистанционной формы обучения, но может быть использован и студентами других форм обучения.

621.38/К89

Кузнецов, Е. М. Силовая электроника. Мощные полупроводниковые приборы. Вентильные преобразователи электроэнергии : учеб. пособие для вузов по направлению подготовки «Электротехника и электротехника», модуль «Электротехника» / Е. М. Кузнецов, О. А. Лысенко. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 106 с.

Приведены описания, параметры и характеристики мощных ключевых полупроводниковых приборов и режимы работы силовых ключей. Рассмотрены преобразователи переменного напряжения в постоянное и их схемная реализация. Представлены виртуальные лабораторные работы, охватывающие основные разделы дисциплины «Силовая электроника». Лабораторные работы подготовлены в системе схемотехнического проектирования Multisim.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОФИЛЯ КОЛЛЕКТОРА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА РАБОТУ СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА

Данная статья содержит результаты, полученные при исследовании взаимодействия щетки машины постоянного тока с коллектором в процессе работы машины постоянного тока. Составлены расчетная схема и математическая модель движения щетки в окне щеткодержателя при вращении коллектора. Проведен анализ полученных расчетных графиков перемещения щетки.

Ключевые слова: машины постоянного тока, электрические щетки, износ щеток, коллекторно-щеточный узел.

Повышение технико-эксплуатационных характеристик машин постоянного тока (МПТ) ограничивается в большей степени надежностью работы коллекторно-щеточного узла (КЩУ). Коммутационная устойчивость МПТ в значительной мере определяется электромеханическими факторами, связанными с работой КЩУ [1].

Одна из причин неудовлетворительной коммутации — нестабильность скользящего контакта [2], приводящая в том числе к отрыву щеток и, следовательно, к искрообразованию даже при малых частотах вращения. В связи с этим актуальной является задача по определению воздействия профиля коллектора на устойчивость работы контакта «щетка — коллектор».

Наиболее распространенные конструкции КЩУ включают в себя следующие элементы: щетку, опирающуюся на поверхность коллектора, корпус щеткодержателя и рычаг с нажимной пружиной.

Особенностью работы КЩУ как механической системы является тот факт, что, за счет вращения коллектора и силы нажатия щетки на него, на щетку действует сила трения, направленная в сторону вращения коллектора по касательной к его поверхности [3].

Для определения воздействия профиля коллектора на устойчивость работы контакта «щетка — коллектор» составлена расчетная схема, соответствующая наиболее распространенной конструкции щеткодержателя МПТ (рис. 1).

При составлении схемы и дифференциальных уравнений были приняты следующие допущения:

1. Угловая скорость коллектора считается постоянной.
2. Силы взаимодействия щетки со стенками щеткодержателя и поверхностью коллектора считаются упругими.
3. Вязкими силами в точках контакта щетки с боковыми стенками щеткодержателя и поверхностью коллектора пренебрегаем ввиду малых величин скорости перемещения щетки.

4. Воздействие пружины на щетку осуществляется через рычаг щеткодержателя; давление от пружины принято постоянным ввиду незначительного изменения величины нажатия при деформации пружины.

5. Силы трения между щеткой и другими элементами пропорциональны нормальному давлению (линейные).

6. Щетка является абсолютно твердым телом, деформация щетки отсутствует.

На схеме можно выделить следующие элементы: корпус щеткодержателя, щетку и нажимной рычаг щеткодержателя. Между щеткой и боковыми стенками щеткодержателя имеется сила сухого трения. Сверху щетка прижимается к коллектору нажимным рычагом в точке А. Сила нажатия на щетку определяется силой упругости нажимной пружины, имеющей жесткость J_{np} . Между щеткой и стенками окна щеткодержателя имеется суммарный зазор Δ .

Для оценки расчета перемещений щетки в щеткодержателе (с учетом сил, действующих на щетку) при вращении коллектора составим и запишем систему дифференциальных уравнений движения щетки в виде

$$\begin{aligned} M\ddot{z} + F_{\text{щц}01} + F_{\text{щц}02} - P_h - Mg + P_K = 0, \\ M\ddot{y} + F_{\text{щп}} + F_{\text{щрк}} - Y_1 + Y_2 = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $z(t)$ — обобщенная координата щетки по вертикальной оси (соответствует координате правого края щетки);

$y(t)$ — обобщенная координата щетки по горизонтальной оси (соответствует координате нижнего края щетки);

M — масса щетки с учетом массы рычага щеткодержателя;

ω — угловая скорость якоря электродвигателя, рад/с;

P_K — упругая сила в контакте щетки и коллекторной пластины;

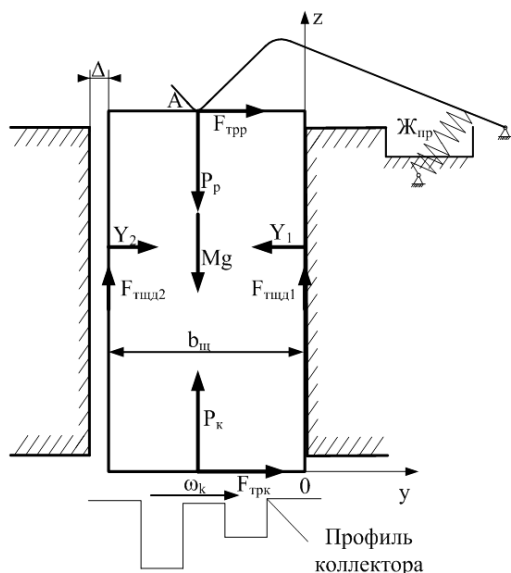


Рис. 1. Расчетная схема коллекторно-щеточного узла

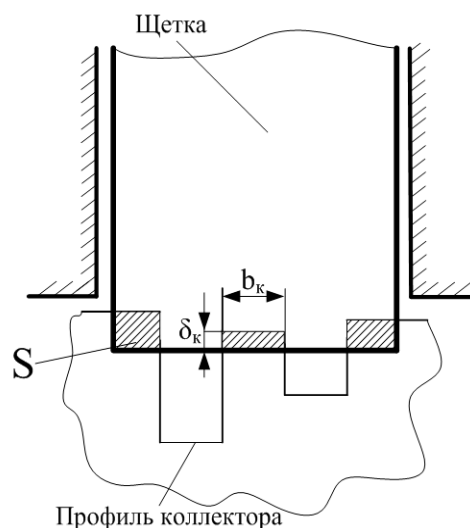


Рис. 2. Контакт щетки с поверхностью коллектора

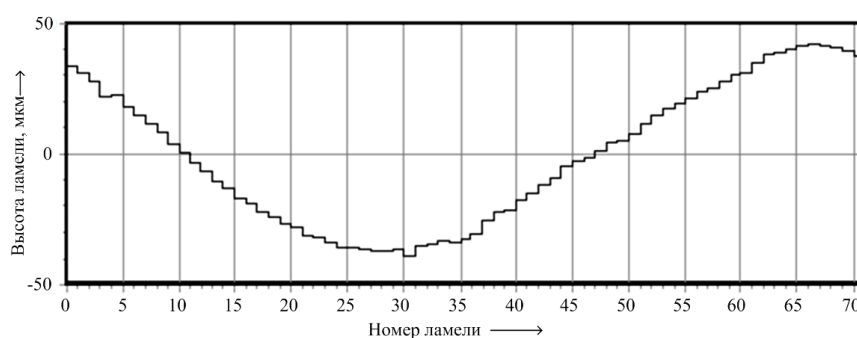


Рис. 3. Профилограмма коллектора двигателя ПЗ1М

P_p — вертикальная сила нажатия рычага на щетку в точке А;

$F_{трр} = f_{щд} \cdot P_p \cdot \text{sign}(\dot{y})$ — сила трения между щеткой и рычагом щеткодержателя;

$F_{трк} = f_k \cdot P_k$ — сила трения между щеткой и коллекторной пластиной;

f_k — коэффициент сухого трения скольжения между поверхностью контакта щетки и коллекторной пластиной;

$F_{трц1} = f_{щд} \cdot Y_1 \cdot \text{sign}(\dot{z})$; $F_{трц2} = f_{щд} \cdot Y_2 \cdot \text{sign}(\dot{z})$ — сила трения между щеткой и стенками щеткодержателя;

$f_{щд}$ — коэффициент сухого трения скольжения между поверхностью контакта щетки и боковыми стенками щеткодержателя;

Y_1, Y_2 — горизонтальные упругие силы в точках контакта щетки с боковыми стенками щеткодержателя, пропорциональные упругой деформации;

Mg — сила тяжести, действующая на щетку.

Контакт щетки в зависимости от щеточного перекрытия возможен одновременно с несколькими коллекторными пластинами (рис. 2). Поэтому механическое воздействие со стороны коллектора на щетку передается от каждой коллекторной пластины. Таким образом, упругую силу воздействия со стороны коллектора на щетку можно определить следующим образом:

$$P_k = \sum_n^{n+\gamma} S_i c_k, \quad (2)$$

где $S_i = \sum_n^{n+\gamma} b_{ki} \delta_k$ — проекция объема деформируемого

материала коллектора на вертикальную плоскость; b_{ki} — ширина перекрытия щеткой i -й пластины коллектора;

$\delta_{ki} = (\eta_i(t) - z(t))$ — величина линейной деформации i -й пластины коллектора, находящейся под щеткой;

$\eta_i(t)$ — высота i -й пластины коллектора; n — номер пластины, контактирующей со сбегающим краем щетки;

γ — величина щеточного перекрытия, округленная в большую сторону до целого числа;

c_k — коэффициент упругости материала коллектора.

Воздействие неровностей поверхности коллектора на стабильность контакта рассмотрим на примере реального профиля коллектора двигателя ПЗ1М. Профилограмма коллектора представлена на рис. 3.

В результате решения системы дифференциальных уравнений (1) численным методом Рунге — Кутты с использованием математического программного пакета Mathcad 14 получены следующие результаты по горизонтальному и вертикальному перемещению щетки при движении ее по коллектору, приведенные на рис. 4.

На графике тангенциальных перемещений (рис. 4б) выделены два участка ST и TV: на участке времени от точки S до точки T щетка прижата к правой стенке щеткодержателя ($y \geq 0$); на участке

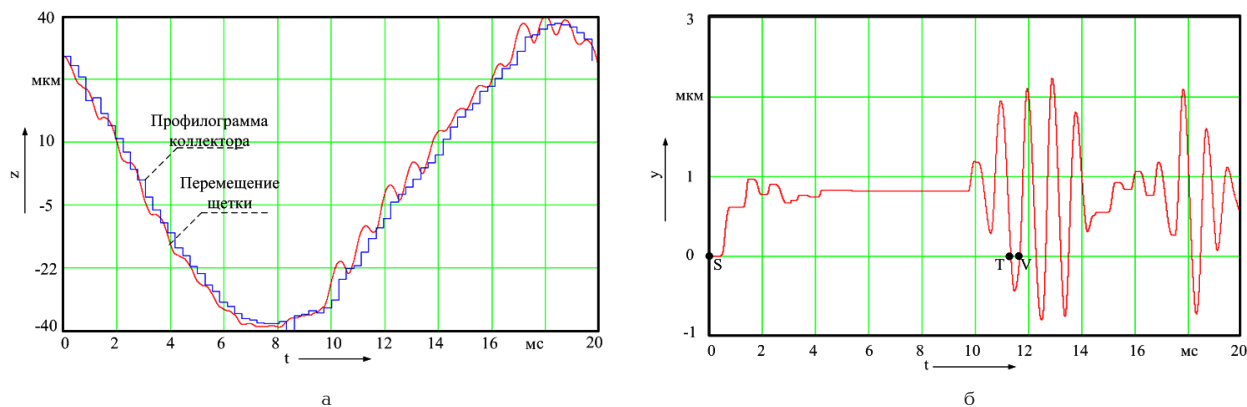


Рис. 4. Перемещение щетки при движении ее по коллектору:
а — радиальное перемещение щетки; б — тангенциальное перемещение щетки

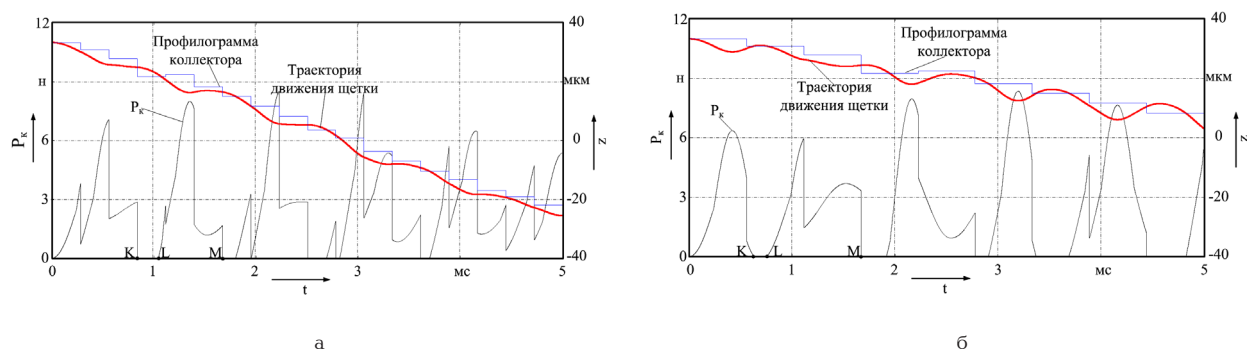


Рис. 5. Фрагменты графика движения щетки по одному участку коллектора и упругие силы в зоне контакта «щетка — коллектор» при скорости вращения двигателя: а — 3000 об/мин; б — 1500 об/мин

TV щетка отскочила от правой стенки щеткодержателя ($y < 0$).

Для оценки влияния неровности профиля коллектора на стабильность работы контакта «щетка — коллектор» можно использовать величину упругой силы контакта P_k [4].

На рис. 5 приведены фрагменты графика движения щетки по одному участку коллектора и упругие силы в зоне контакта «щетка — коллектор» при различных скоростях вращения двигателя.

На графике радиальных перемещений можно выделить две зоны, на участке от точки К до точки L происходит отрыв щетки от поверхности коллектора ($P_k = 0$), а на участке LM щетка прижата к коллектору.

Радиальные колебания щетки приводят к изменению силы упругого контакта P_k , вследствие чего происходит изменение падения напряжения под щеткой, а следовательно, и нарушение оптимальных условий коммутации. Тангенциальные же колебания, в свою очередь, приводят к изменению периода коммутации секций якорной обмотки, что также обуславливает появление неидентичности коммутационных циклов [5].

Анализ полученных данных показывает, что воздействие профиля коллектора в значительной мере влияет на состояние коммутации МПТ, а следовательно, и на износ элементов КЩУ. В работе [6] приводится алгоритм по определению износа элементов КЩУ, где автор учитывает механическое воздействие на щетку со стороны коллектора путем введения соответствующего виброускорения в алгоритм прогнозирования износа.

Представленная математическая модель может быть использована для определения виброускорения щетки, обусловленного воздействием со стороны коллектора, и, таким образом, для прогнозирования ресурса работы щеток с учетом режимов работы двигателя.

Библиографический список

1. Авилов, В. Д. Методика нормирования качества коммутации в тяговых электрических машинах / В. Д. Авилов, Ш. К. Исмаилов // Известия Транссиба. — 2012. — № 2 (10). — С. 2–6.
2. Ахунов, Д. А. Определение диагностических параметров для оценки состояния профиля коллектора тягового электродвигателя / В. В. Харламов, Д. А. Ахунов, Р. В. Сергеев, А. В. Долгова, П. К. Шкодун // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2011. — 1 (97). — С. 121–125.
3. Харламов, В. В. Совершенствование технологии диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей электровозов: моногр. / В. В. Харламов, Д. А. Ахунов, А. В. Долгова. — Омск, 2015. — 233 с.
4. Ахунов, Д. А. Совершенствование методов оценки технического состояния коллектора электрических машин постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Ахунов Данил Асгатович. — Омск, 2013. — 133 с.
5. Харламов, В. В. Диагностирование состояния коммутации коллекторных электродвигателей с использованием прибора ПКК-5М / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. П. Афонин // Известия Транссиба. — 2013. — № 1 (13). — С. 42–48.

6. Качин, О. С. Повышение ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01. Качин Олег Сергеевич. — Томск, 2008. — 178 с.

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой электрических машин и общей электротехники.

ПОПОВ Денис Игоревич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электрических машин и общей электротехники.

БАЙСАДЫКОВ Марсель Фаритович, аспирант кафедры электрических машин и общей электротехники.

Адрес для переписки: marsel_b@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.04.2016 г.

© В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков

УДК 621.313:621.7.08

**В. В. ХАРЛАМОВ
Д. И. ПОПОВ
А. П. АФОНИН
А. С. ОГНЕВСКИЙ**

Омский государственный
университет путей сообщения

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С УЧЕТОМ НЕИДЕНТИЧНОСТИ КОММУТАЦИОННЫХ ЦИКЛОВ

В статье приведены двудольные графы соответствия дефектов и диагностических параметров коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока. На основании проведенных экспериментов получены уравнения регрессии, позволившие проанализировать влияние различных факторов на интенсивность искрения, а также неидентичность в коммутации как в одной и той же секции от оборота к обороту якоря (неидентичность во времени), так и в различных секциях за один оборот якоря (неидентичность по коллектору). Даны рекомендации по повышению достоверности диагностирования механических неисправностей.

Ключевые слова: электрическая машина, диагностические параметры, коллекторно-щеточный узел, неидентичность коммутационных циклов, среднее квадратическое отклонение интенсивности искрения.

На техническое состояние коллекторно-щеточного узла (КЩУ) электрической машины оказывает влияние множество факторов [1] электромагнитной и механической природы, связанных с различными параметрами машины, а также с несимметрией ее геометрии, что приводит к неидентичности коммутационных циклов [2]. Кроме того, значительное влияние оказывают и внешние факторы, связанные с условиями работы, например температура окружающей среды, влажность, внешняя вибрация и другие [3].

Анализ коммутационного процесса коллекторных электрических машин показывает, что в результате действия множества факторов различной природы возникает неидентичность коммутационных циклов в секциях обмотки якоря. При этом неидентичность выражена в коммутации как

в одной и той же секции от оборота к обороту якоря (неидентичность во времени), так и в различных секциях за один оборот якоря (неидентичность по коллектору).

В связи с этим предложено состояние коммутации машин постоянного тока (МПТ) оценивать не только по среднему значению интенсивности искрения, но и по среднему квадратическому отклонению (СКО) интенсивности искрения во времени и по коллектору.

Для выявления диагностических параметров, позволяющих оценить техническое состояние КЩУ электрической машины и отвечающих требованиям доступности измерения, достоверности результатов измерения, информативности и различительной способности, применен графоаналитический метод с последующей декомпозицией исходной

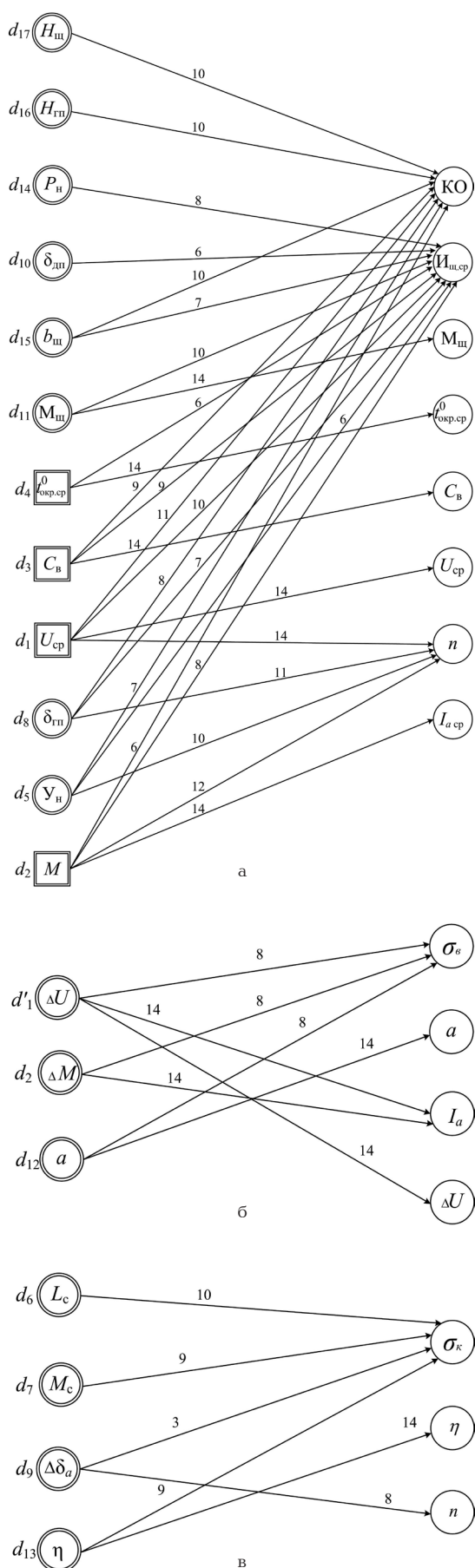


Рис. 1. Двудольные графы соответствия дефектов и диагностических параметров КЩУ: а — определяющие средний уровень искрения; б — определяющие неидентичность коммутационных циклов во времени; в — определяющие неидентичность коммутационных циклов по коллектору

граф-модели по характеру воздействия факторов на процесс коммутации МПТ [4].

В результате сформированы множества диагностических параметров для оценки работы КЩУ в целом по машине $B_1 = \{\text{круговой огонь (КО), средний уровень искрения щеток (I_{ш.ср}), марка щетки (M_{ш}), температура окружающей среды (t_{окр.ср}), влажность (C_{в}), среднее значение напряжения питания (U_{ср}), частота вращения (n), среднее значение тока якоря (I_{а.ср})\}$; для оценки неидентичности коммутационных циклов во времени $B_2 = \{\text{СКО интенсивности искрения во времени (\sigma_{к}), вибрация испытуемой машины (a), ток якоря (I_{а}), изменение напряжения питания (\Delta U)\}$; для оценки неидентичности коммутационных циклов по коллектору $B_3 = \{\text{СКО интенсивности искрения по коллектору (\sigma_{к}), профиль коллектора (\eta), частота вращения (n)\}$.

Исходя из множеств B_1, B_2 и B_3 сформированы двудольные графы соответствия множества дефектов с множеством диагностических параметров (рис. 1).

С целью получения математических зависимостей, связывающих значение уровня искрения в КЩУ с параметрами работы электрической машины, проведены экспериментальные исследования. В процессе исследований изменялись следующие входные параметры: ток якоря I_a , ток подпитки (отпитки) добавочных полюсов I_n (I_o), частота вращения якоря n и величина нарастания (спада) тока якоря ΔI_a , обусловленная мгновенным подключением или отключением части нагрузки. В качестве выходных параметров эксперимента приняты: среднее значение интенсивности искрения $I_{ср}$, СКО интенсивности искрения по коллектору σ_k и СКО интенсивности искрения во времени σ_b .

Эксперименты проведены как для переходного (входные параметры: $I_n/I_o, \Delta I_a, n$), так и для установившегося режима работы (входные параметры: $I_n/I_o, I_a, n$). Исходя из номинальных параметров испытуемой машины были выбраны основные уровни и интервалы варьирования факторов (табл. 1).

Приняв в качестве параметров оптимизации интенсивность искрения y_1 и его среднеквадратическое отклонение во времени y_2 и по коллектору y_3 , использовали следующую линейную регрессионную модель:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3$$

где i — номер от 1 до 3.

Для сбора экспериментальных данных разработаны матрицы планирования (табл. 2, 3).

В результате математической обработки экспериментальных данных получены следующие уравнения регрессии с кодированными переменными: для переходного режима при подпитке:

$$y_1 = 19,715 + 14,151x_1 - 3,742x_2 + 5,54x_3 - 2,576x_1x_2 + 4,477x_1x_3 - 0,13x_2x_3,$$

$$y_2 = 6,175 + 3,338x_1 - 0,933x_2 - 0,48x_3 - 0,929x_1x_2 - 1,405x_1x_3 + 0,359x_2x_3,$$

$$y_3 = 3,232 + 1,739x_1 - 0,519x_2 + 0,639x_3 - 0,346x_1x_2 + 0,531x_1x_3 - 0,054x_2x_3;$$

для переходного режима при отпитке:

Основные уровни и интервалы варьирования входных параметров при подпитке/отпитке в переходном и установившемся режимах

Входные параметры	$I_{ш}, A$	$I_{о}, A$	$I_{в}, A$	$\Delta I_{в}, A$	$n, \text{мин}^{-1}$
Кодовое обозначение	x_1		x_2		x_3
Основной уровень	2,25	2,5	7	0	1750
Интервал варьирования	0,75	0,5	5	10	250
Верхний уровень	3	3	12	10	2000
Нижний уровень	1,5	2	2	-10	1500

Таблица 2

Матрица планирования и результаты опытов в переходном режиме

Кодированное значение входного параметра				Значение выходного параметра					
				при подпитке			при отпитке		
x_0	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	y_1	y_2	y_3
+	-	-	-	4,990	1,834	1,512	5,53	1,290	1,205
+	-	-	+	8,472	3,848	1,820	4,795	1,240	1,180
+	-	+	-	4,013	1,990	1,258	5,795	1,610	1,490
+	-	+	+	4,784	3,677	1,382	4,86	1,310	1,235
+	+	-	-	30,585	14,060	4,605	9,895	7,755	2,025
+	+	-	+	49,784	8,690	7,067	13,15	9,540	3,845
+	+	+	-	17,113	8,736	2,997	10,805	6,170	3,275
+	+	+	+	37,982	6,568	5,214	15,64	11,600	4,475

Таблица 3

Матрица планирования и результаты опытов в стационарном режиме

Кодированное значение входного параметра				Значение выходного параметра					
				при подпитке			при отпитке		
x_0	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	y_1	y_2	y_3
+	-	-	-	5,342	1,536	1,544	2,532	0,570	0,559
+	-	-	+	7,076	1,239	1,383	2,518	0,566	0,559
+	-	+	-	6,434	2,453	2,154	4,824	2,131	1,526
+	-	+	+	11,229	3,926	3,495	7,377	2,754	2,238
+	+	-	-	43,475	4,629	4,314	2,494	0,575	0,565
+	+	-	+	51,854	6,664	7,363	2,515	0,574	0,565
+	+	+	-	13,276	3,422	3,298	3,655	1,181	1,107
+	+	+	+	37,173	5,522	5,827	9,811	4,149	3,668

Расчетные значения F-критерия для опытов в различных режимах

Режим нагрузки	Режим подпитки добавочных полюсов			Режим отпитки добавочных полюсов		
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_1	Y_2	Y_3
Переходный	0,656	1,133	0,007	0,138	0,737	0,027
Стационарный	1,391	0,506	1,942	0,554	0,266	0,612

$$y_1 = 8,809 + 3,564x_1 + 0,466x_2 + 0,803x_3 + 0,384x_1x_2 + 1,22x_1x_3 + 0,173x_2x_3,$$

$$y_2 = 5,064 + 3,702x_1 + 0,108x_2 + 0,858x_3 + 0,011x_1x_2 + 0,946x_1x_3 + 0,424x_2x_3,$$

$$y_3 = 2,341 + 1,064x_1 + 0,278x_2 + 0,343x_3 + 0,192x_1x_2 + 0,413x_1x_3 - 0,106x_2x_3;$$

для стационарного режима при подпитке:

$$y_1 = 21,982 + 14,462x_1 - 4,954x_2 + 4,851x_3 - 6,266x_1x_2 + 3,218x_1x_3 + 2,322x_2x_3,$$

$$y_2 = 3,678 + 1,389x_1 + 0,161x_2 + 0,668x_3 - 0,74x_1x_2 + 0,374x_1x_3 + 0,233x_2x_3,$$

$$y_3 = 3,672 + 1,528x_1 + 0,021x_2 + 0,845x_3 - 0,659x_1x_2 + 0,55x_1x_3 + 0,123x_2x_3;$$

для стационарного режима при отпитке:

$$y_1 = 4,466 + 0,153x_1 + 1,951x_2 + 1,089x_3 + 0,163x_1x_2 + 0,455x_1x_3 + 1,088x_2x_3,$$

$$y_2 = 1,563 + 0,057x_1 + 0,991x_2 + 0,448x_3 + 0,054x_1x_2 + 0,293x_1x_3 + 0,45x_2x_3,$$

$$y_3 = 1,348 + 0,128x_1 + 0,786x_2 + 0,409x_3 + 0,125x_1x_2 + 0,231x_1x_3 + 0,409x_2x_3.$$

Проверка гипотезы адекватности полученных регрессионных моделей произведена по F-критерию Фишера. Для этого найдено расчетное значение критерия по выражению

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}.$$

Дисперсия адекватности вычислена по выражению

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{f},$$

где y_j — экспериментальное значение параметра оптимизации в j -м опыте;

\hat{y}_j — значение параметра оптимизации в j -м опыте, вычисленное по уравнению регрессии с кодированными переменными;

f — число степеней свободы, $f = N - (k + 1)$;

N — число опытов, равное 8;

k — число факторов, равное 3.

Дисперсию S_y^2 параметра оптимизации вычисляем по результатам трех опытов в центре плана, т.е. при $x_1 = x_2 = x_3 = 0$, по следующему выражению:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2}{n_0 - 1},$$

где n_0 — число опытов в центре плана;

y_u — значение параметра оптимизации в u -м опыте в центре плана;

\bar{y} — среднеарифметическое значение y_u во всех опытах в центре плана.

При 5 %-м уровне значимости и числе степеней свободы $f = 2$ табличное значение критерия Фишера $F_m = 6,9$.

Так как табличное значение (F_m) больше всех полученных расчетных значений (F_p) (табл. 4), модели, представленные регрессионными уравнениями, можно считать адекватными.

Проанализируем соответствие полученных регрессионных моделей двудольным графам (рис. 1).

Параметры d_1 , d_9 и d_{12} , зависящие от скорости вращения (n), оказывают значительное влияние на неидентичность коммутационных циклов как во времени (рис. 1б), так и по коллектору (рис. 1в). Это же подтверждается и тем, что коэффициенты во всех регрессионных уравнениях, определяющих y_2 и y_3 , стоящие перед переменной x_3 , имеют близкие значения.

Параметр d_2 , зависящий от тока якоря, оказывает большее влияние на неидентичность коммутационных циклов во времени (рис. 1б). Это же подтверждается и тем, что коэффициенты в регрессионных уравнениях, стоящие перед переменной x_2 , в некоторых режимах работы имеют значительно большие значения при определении СКО уровня искрения во времени $\sigma_{в'}$, чем по коллектору; при этом в остальных режимах работы значения этих коэффициентов близки друг другу.

Параметры d_6 и d_7 , зависящие от параметров магнитной системы машины, оказывают большее влияние на неидентичность коммутационных циклов по коллектору (рис. 1в). Это же подтверждается и тем, что коэффициенты в регрессионных уравнениях, стоящие перед переменной x_1 , в некоторых режимах работы имеют значительно большие значения при определении СКО уровня искрения по коллектору $\sigma_{к'}$, чем во времени; при этом в остальных режимах работы значения этих коэффициентов близки друг другу. Следовательно, адекватность полученных регрессионных уравнений также косвенно подтверждается их соответствием представленным двудольным графам (рис. 1).

Таким образом, полученные регрессионные уравнения позволяют проанализировать и оценить

зависимость среднего уровня искрения, а также СКО уровня искрения во времени и по коллектору от факторов как механической, так и электромагнитной природы.

Анализ полученных уравнений также показывает, что при низком среднем уровне искрения (в рассмотренном случае это стационарный режим при отпитке) в значительной мере повышается значимость коэффициентов, связанных с СКО уровня искрения по отношению к коэффициентам, связанным со средним уровнем искрения. Следовательно, при лучшей настройке машины с точки зрения устранения электромагнитных факторов, приводящих к искрообразованию, большую информативность получают такие диагностические параметры, как СКО уровня искрения во времени σ_b и по коллектору $\sigma_{k'}$, отражающие неидентичность коммутационных циклов, обусловленную механическими факторами искрения.

Отсюда можно заключить, что повышение достоверности диагностирования механических неисправностей по значениям СКО уровня искрения по коллектору и во времени возможно за счет предварительного снижения влияния электромагнитных факторов.

Библиографический список

1. Харламов, В. В. Определение диагностических параметров для оценки состояния профиля коллектора тягового электродвигателя / В. В. Харламов, Р. В. Сергеев, П. К. Шкодун, Д. А. Ахунов, А. В. Долгова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2011. – № 1 (97). – С. 121 – 125.

2. Авиллов, В. Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока : моногр. / В. Д. Авиллов – М. : Энергоиздат, 1995. – 237 с.

3. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока : моногр. / В. В. Харламов ; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2002. – 233 с.

4. Харламов, В. В. Формирование эффективного множества диагностических параметров для контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей в условиях неидентичности коммутационных циклов / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. П. Афонин // Известия Транссиба. – 2012. – № 4 (12). – С. 69–75.

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой электрических машин и общей электротехники.

ПОПОВ Денис Игоревич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электрических машин и общей электротехники.

АФОНИН Александр Петрович, соискатель по кафедре электрических машин и общей электротехники.

ОГНЕВСКИЙ Андрей Сергеевич, студент гр. 41Г электромеханического факультета.

Адрес для переписки: PopovOmsk@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 13.04.2016 г.

© В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. П. Афонин, А. С. Огневский

Книжная полка

621.1М69

Михайлов, А. Г. Теоретические основы теплотехники : практикум / А. Г. Михайлов, П. А. Батраков. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. – 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).

Приведены задачи, примеры и методы их решения, лаконично и последовательно изложены теоретические основы теплотехники, знание которых необходимо для решения задач прикладной теплотехники. Практикум предназначен студентам энергетических направлений подготовки: 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 13.03.03 «Энергетическое машиностроение».

621.311/Г90

Грунин, В. К. Основы электроснабжения объектов. Расчет электрических нагрузок : конспект лекций / В. К. Грунин. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. – 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены характеристика и структура систем электроснабжения, классификация и характеристика как приемников, так и потребителей электрической энергии. Представлены графики электрических нагрузок и коэффициенты, характеризующие графики. Приведены методы расчета нагрузок на различных уровнях СЭС и даны рекомендации по их выбору. Предназначен для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» очной, очно-заочной и заочной форм обучения.

621.31/И90

История электроэнергетики : конспект лекций / В. Н. Горюнов [и др.]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. – 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).

Для студентов 1-го курса дневной, вечерней, заочной, а также дистанционной форм обучения по специальности 140211 «Электроснабжение промышленных предприятий».

АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ПАЗОВЫХ ГАРМОНИК ПО СПЕКТРУ СИГНАЛА ТОКА СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В статье описывается алгоритм, позволяющий осуществлять автоматический поиск пазовых гармоник в спектре сигнала тока статора. Приведен пример работы алгоритма и даны рекомендации по улучшению его работы. Предлагаемый метод может быть использован при разработке бездатчикового устройства для определения частоты вращения ротора асинхронных двигателей.

Ключевые слова: пазовые гармоники, спектр тока статора, спектр напряжения статора, выделение пазовых гармоник, быстрое преобразование Фурье.

В настоящее время разработано достаточно большое количество алгоритмов поиска пазовых гармоник в сигнале тока статора, описанных в [1–3]. Однако в большинстве из них используется большое количество математических операций и предъявляются, как следствие, высокие требования к вычисляющей аппаратуре. Поэтому возникает потребность в более «быстрых» алгоритмах, особенно в тех случаях, когда нет возможности применять высокоскоростные микропроцессоры, либо в случаях ограниченности бюджета на применение бездатчиковых устройств определения частоты вращения ротора асинхронного двигателя.

В настоящей статье приводится простой алгоритм поиска пазовых гармоник и вычисления скольжения ротора, который использует только преобразование Фурье (БПФ), операции деления и умножения. Данный алгоритм может применяться для определения частоты вращения ротора в диапазоне номинальной работы двигателя при работе от промышленной трехфазной сети, а также от частотного преобразователя напряжения. Алгоритм сохраняет работу даже при дефектах двигателя и некачественном питании.

Алгоритм использует нахождение пазовых гармоник в спектре сигнала тока статора, которые располагаются на частотах

$$f_{nz} = f_1 \left(R \frac{1-s}{p} \pm k \right), \quad (1)$$

где f_1 — частота питания сети; p — число пар полюсов двигателя; R — число пазов ротора; s — скольжение; k — порядок гармоники, целое 1, 3, 5...

Как видно из (1), пазовые гармоники имеют *периодичность следования в спектре*, равную $2f_1$. Это свойство используется в данном алгоритме для автоматического поиска пазовых гармоник.

На рис. 1 приведена блок-схема предлагаемого алгоритма. Входными данными для алгоритма являются: R — число пазов ротора, которое можно узнать из документации на двигатель либо попытаться определить самостоятельно; p — число пар полюсов; $s_{ном}$ — номинальное скольжение. С помощью двухканального АЦП получают сигналы тока S_i и напряжения S_u статора при частоте дискретизации f_s . Далее над каждым сигналом выполняется БПФ — и полученные спектры сигнала тока A_i и напряжения A_u нормализуют с помощью выражения

$$A_{норм} = \frac{A_k}{\max(A)}, \quad k = 0 \dots N, \quad (2)$$

где A — нормализуемый спектр; N — количество выборок.

В спектре сигнала напряжения определяется частота основной гармоники f_1 . Далее амплитуды спектра тока делятся на соответствующие им по частоте амплитуды спектра напряжения с целью ослабления гармоник, вызванных некачественным питанием двигателя. Полученный спектр снова нормализуется.

Ширина диапазона поиска пазовых гармоник определяется по формуле

$$f_{\text{диаз}} = \frac{f_1 R}{p} s_{ном}. \quad (3)$$

Далее вычисляются четыре диапазона, которые соответствуют расположению пазовых гармоник с порядком $k = -3, -1, 1, 3$. Частоты, определяющие границы диапазонов, находятся следующим образом:

$$f_{1,n} = \frac{f_1 R}{p} \left(1 - s_{ном} + \frac{pk}{R} \right), \quad (4)$$

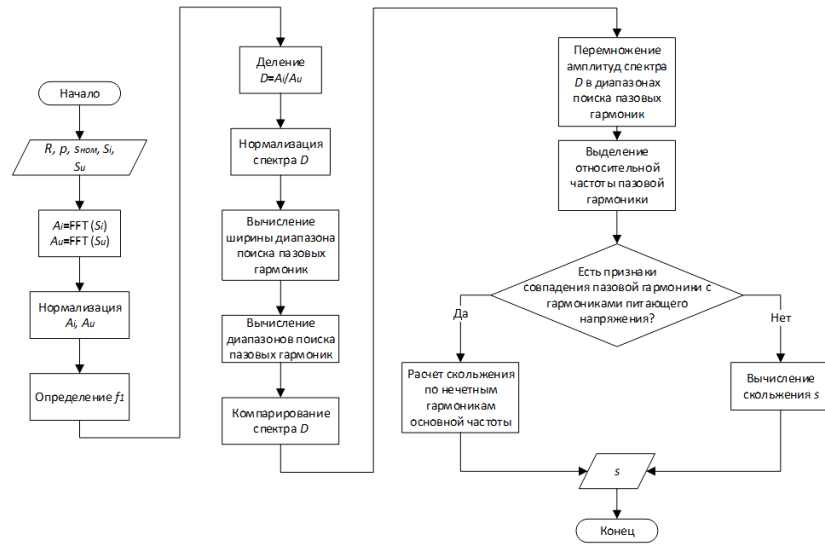


Рис. 1

$$f_{2,n} = f_1 \left(\frac{R}{p} + k \right), \quad (5)$$

где $k = -3, -1, 1, 3$ соответственно каждому из четырех диапазонов.

В полученном после нормализации и деления спектре D отсекаются все амплитуды меньше числа ε , которое выбирается равным средней амплитуде частот в диапазоне расположения пазовых гармоник, определяемого частотами $f_{1,1} \dots f_{2,4}$:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{n=f_{1,1}}^{f_{2,4}} D(n). \quad (6)$$

Компарированный спектр D разбивается на четыре диапазона, вычисленные по формулам (3) и (4). Полученные диапазоны перемножаются. Таким образом усиливаются амплитуды, которые располагаются на частоте двойного питания друг от друга, и ослабляются амплитуды, которые не имеют такого свойства.

В полученном спектре находят максимальную амплитуду и соответствующую ей *относительную частоту пазовой гармоники* $f_{омн}$. При этом скольжение ротора определяется по формуле

$$s = \frac{(2f_1 - f_{омн})p}{f_1 R}. \quad (7)$$

После вычисления скольжения по известным формулам находится частота вращения ротора двигателя.

Рассмотрим работу алгоритма на примере двигателя АИРМ63В4У3, имеющего две пары полюсов и число пазов ротора, равное 30, нагруженного на генератор тока.

Схема эксперимента представлена на рис. 2, где R — реостат; ПК — персональный компьютер; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ДН — датчик напряжения.

Нормализованные спектры тока и напряжения в области нахождения пазовых гармоник показаны на рис. 3.

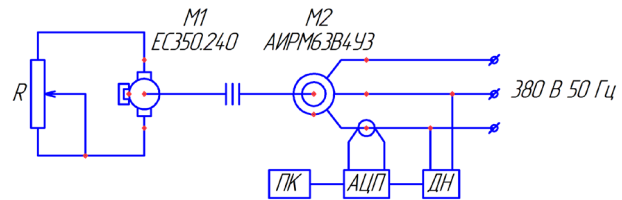


Рис. 2

Номинальное скольжение для данного двигателя равно 0,08. Размер диапазона поиска пазовых гармоник определяется как

$$f_{дnc} = \frac{50 \cdot 30}{2} 0,08 = 60 \text{ Гц.}$$

Границы диапазонов поиска пазовых гармоник находятся для $k = -3$

$$f_{1,1} = \frac{50 \cdot 30}{2} \left(1 - 0,08 + \frac{-3 \cdot 2}{30} \right) = 540 \text{ Гц,}$$

$$f_{2,1} = 50 \left(\frac{30}{2} - 3 \right) = 600 \text{ Гц;}$$

для $k = -1$ $f_{1,2} = 640$ Гц, $f_{2,2} = 700$ Гц; для $k = 1$ $f_{1,3} = 740$ Гц, $f_{2,3} = 800$ Гц; для $k = 3$ $f_{1,4} = 840$ Гц, $f_{2,4} = 900$ Гц.

После деления спектра сигнала тока на спектр сигнала напряжения выделяются спектральные составляющие, величина которых больше ранее вычисленной величины ε , в результате чего получается спектр D , показанный на рис. 4.

На рис. 5 показан процесс выделения и умножения диапазонов из спектра D . В результате умножения получается *относительный спектр* с выделенной *относительной пазовой гармоникой* и в частотном диапазоне от $2f_1 - f_{гр}$ до $2f_1$. Конечный результат выделения пазовой гармоники показан на рис. 6 в линейном масштабе. Частота $f_{омн}$ равна 95,844 Гц, тогда скольжение определяется как

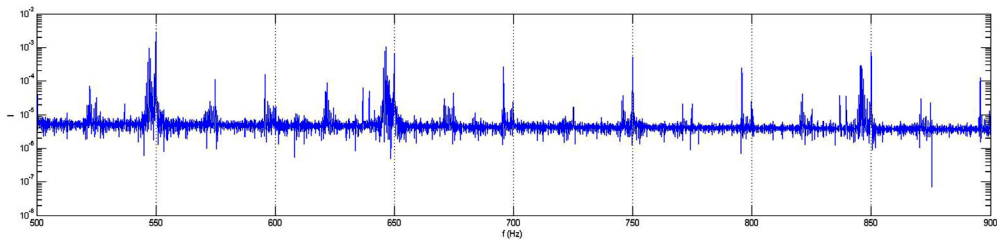


Рис. 3

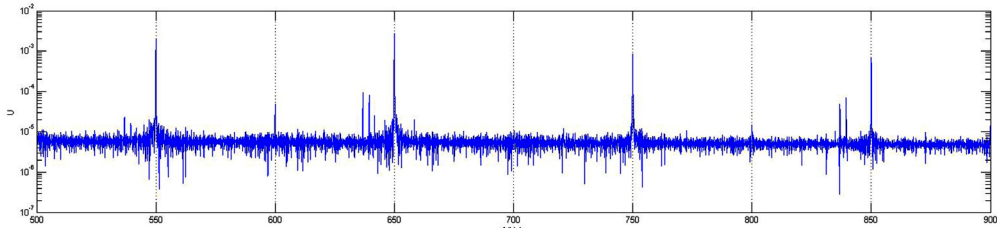


Рис. 4

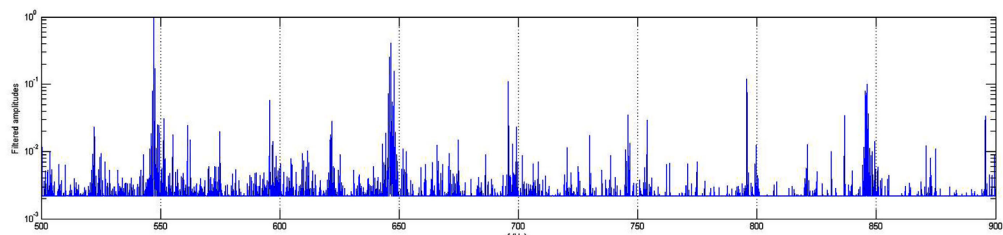


Рис. 5

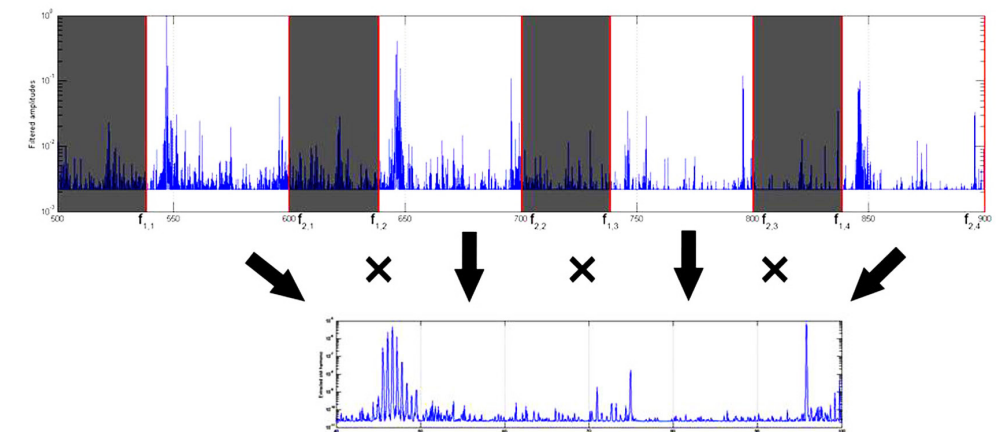


Рис. 6

$$s = \frac{2 \cdot (100 - 95,844)}{50 \cdot 30} = 0,00554$$

В соответствии с этим частота вращения ротора составляет 1491,69 об/мин. Расхождение в вычис-

ленной скорости вращения и полученной с датчика оборота составило менее 0,5%, что указывает на высокую точность метода.

Рассмотрим более сложный вариант, когда двигатель работает от частотного преобразователя

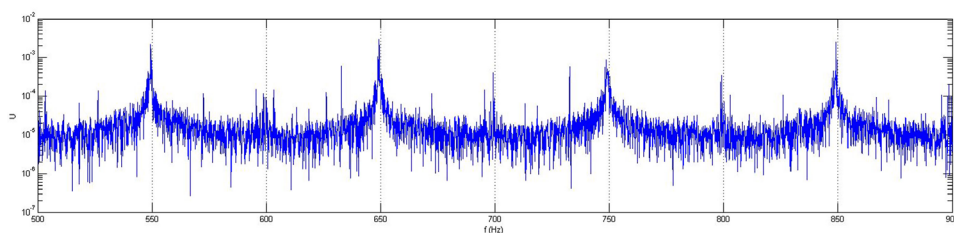
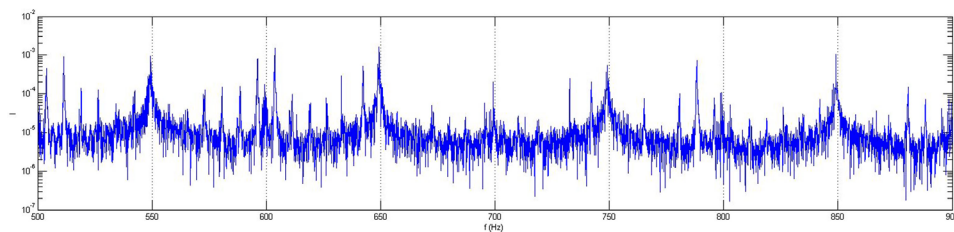


Рис. 7

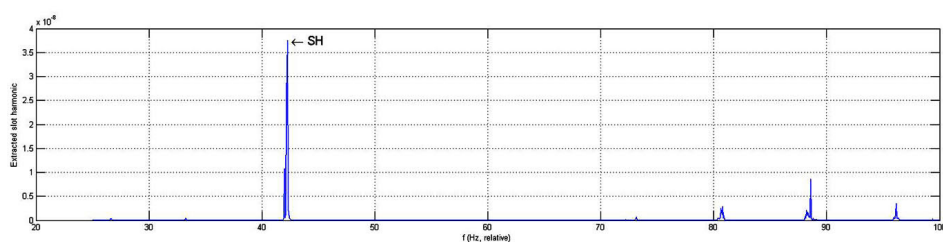


Рис. 8

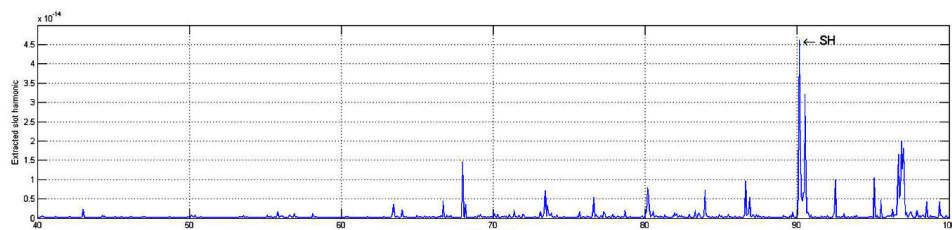


Рис. 9

напряжения. В этом случае спектр сигнала тока и напряжения богат высокочастотными составляющими спектра.

На рис. 7 показан спектр сигнала тока и напряжения, полученный при питании двигателя от частотного преобразователя. Частота сети питания составляет 50 Гц, а частота преобразования — 10 кГц. На спектрах видно присутствие гармонических составляющих, полученных из-за работы преобразователя. Однако описанный алгоритм работает за счет усиления составляющих, повторяющихся через $2f$, раз. Результат выделения пазовых гармоник показан на рис. 8.

Следует обратить особое внимание на тот факт, что возможны случаи, когда пазовые гармоники совпадают по частоте с нечетными гармониками сети. В этом случае будет невозможно корректное выделение их из спектра. Признаком такого совпадения может служить малая амплитуда пазовой гармоники, полученной в результате работы алгоритма. Например, на рис. 9 показан такой случай. Также признаком совпадения пазовой гармоники и нечетной гармоники напряжения может служить резкое изменение вычисленной скорости относительно результата, полученного при предыдущем измере-

нии. Контроль вышеописанных параметров может с высокой долей вероятности спрогнозировать такой случай.

Можно предложить различные методы решения данной проблемы. В частности, при непрерывном контроле перемещения пазовых гармоник по частотной оси спектра тока осуществлять слежение за их появлением в зоне расположения нечетных гармоник сети и производить оценку частоты вращения в этих зонах другими, менее точными методами бездатчикового определения частоты вращения ротора по току статора — например методом поиска частотных компонент эксцентриситета [4]. Вторым вариантом решения проблемы может служить расчет частоты вращения ротора по нечетной гармонике напряжения. Для этого определяют номер нечетной гармоники напряжения, попадающей в диапазон поиска пазовых гармоник, которая находится из условия

$$\frac{R}{p} \left(1 - s_{ном} + \frac{p}{R} \right) \leq v \leq \frac{R}{p} + 1, \quad (8)$$

где v — порядок основной гармоники напряжения, целое нечетное.

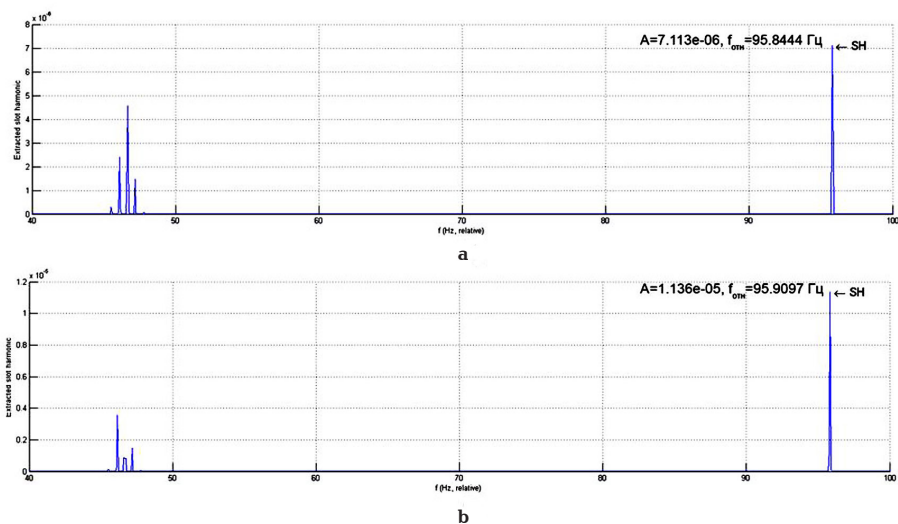


Рис. 10

Найдя ν , можно рассчитать скольжение при условии совпадения пазовых гармоник и нечетных гармоник напряжения:

$$s = (1 - \nu) \frac{p}{R} + 1. \quad (9)$$

Результаты работы метода также существенно зависят от точности определения частоты основной гармоники напряжения. Так, например, известно, что в промышленной трехфазной сети частота питающего напряжения несколько отличается от 50 Гц. Данная погрешность может повлиять на точность вычислений и даже привести к некорректному распознаванию пазовой гармоники, так как диапазоны поиска пазовых гармоник могут сместиться относительно пазовых гармоник на разное количество отчетов БПФ; тогда в процессе умножения амплитуд диапазонов пазовые гармоники будут затухать. Например, на рис. 10 (масштаб линейный) приведено сравнение относительных спектров a — при заданной частоте 50 Гц и b — при автоматическом определении входной частоты, которая составила 49,999 Гц. При этом разность в амплитудах гармоник составила один порядок, разность в расчетах скольжения ротора составила 0,000087, а разница частоты вращения — 0,101 об/мин.

Для решения данной проблемы, например, могут применяться методы корреляционного анализа. Корреляционный анализ широко применим для решения технических задач. В работах [5, 6] описана практическая реализация данного подхода для решения задач оценки гармонических составляющих напряжения.

Базовым параметром метода корреляционных функций является коэффициент корреляции. Для исследуемого напряжения формируется набор эталонов. Далее производится анализ на наличие связи в точках между параметрами исследуемого напряжения и эталона. Наибольшее значение коэффициента корреляции показывает на эталон, параметр которого необходимо выбрать.

Для того чтобы сформировать набор эталонов, требуется определить базовую точку, вокруг которой будут создаваться эталоны (обозначим ее через $[B - 1/2, B + 1/2]$). Эта точка выбирается из ближай-

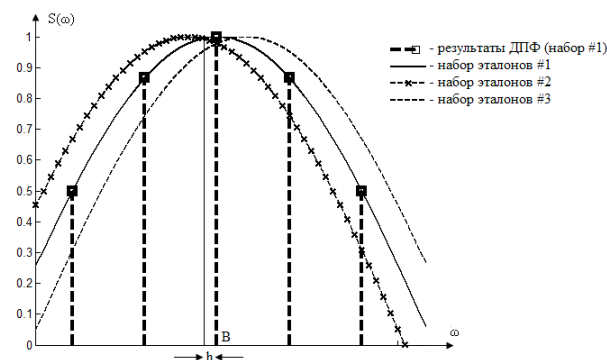


Рис. 11

ших целых значений основной частоты напряжения. Также необходимо определить шаг, с которым будут формироваться эталоны (обозначим его через h). Затем на промежутке следует производить формирование эталонов. Для этого спектр оконной функции необходимо сдвигать вправо и влево с шагом h в пределе заданного промежутка и определять пять точек вокруг пика.

На рис. 11 показан пример построения наборов эталонов (здесь представлено три набора). Первый набор не имеет смещения относительно базовой точки. Вторым набор смещен влево относительно базовой точки на величину шага формирования эталона h . Третий набор смещен вправо относительно базовой точки B на величину шага формирования эталона h . Также для первого набора эталона определены его отсчеты БПФ.

Расчет коэффициента корреляции производится по пяти точкам, так как для дискретного спектра энергия гармоники (порядка 80%) сосредоточена в ближайших 3–5 отсчетах в районе максимума амплитудного спектра. Амплитуда основной гармоники напряжения определяется по формуле

$$A = \frac{1}{E} \cdot \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{i=M} \operatorname{Re}(U_i) \cdot W_{ji} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{i=M} \operatorname{Im}(U_i) \cdot W_{ji} \right)^2}, \quad (10)$$

где E — сумма квадратов значений W_{ji} ; $W_{ji} = \{W_{j0}, W_{j1}, \dots, W_{jM}\}$ — набор эталонных множеств из M точек

(в нашем случае $M=5$); $U=\{U_0, U_1, \dots, U_M\}$ — реализация ДПФ периодического сигнала, состоящего из M точек, ограниченного стандартным частотным окном (окно Кайзера).

Наибольшее значение модуля амплитуды гармоники показывает на пару «эталон — сигнал» и, соответственно, на величину отклонения δ от базовой точки B . Частота гармоник напряжения определяется как сумма значений B и δ .

Таким образом, применение метода корреляционных функций может существенно повысить точность определения главной гармоники напряжения и, как следствие, улучшить результаты выделения пазовых гармоник из спектра сигнала тока статора.

Одним из преимуществ предложенного метода является то, что он сохраняет свою работоспособность даже при различных дефектах двигателя, таких как дефекты ротора, межвитковые замыкания в статоре, дефекты подшипника и эксцентриситет ротора, в отличие от методов бездатчикового определения частоты вращения, основанных на составлении математической модели двигателя.

К недостаткам можно отнести необходимость получения спектров с достаточно высоким разрешением, и, как следствие, использования большого количества памяти для хранения выборок сигнала. Этот недостаток легко устраняется оптимальным выбором частоты дискретизации и количества отчетов сигнала, необходимого для вычисления спектра.

Библиографический список

1. Ertan Hulusi Bulent, Keysan, Ozan, «Speed and rotor position estimation of electrical machines using rotor slot harmonics or higher order rotor slot harmonics», EU patent

2556381 B1, filed April 5th, 2010, published May 7th, 2014.

2. Larry A. Turner, Roy S. Colby, Zhi Gao, «Methods and apparatus for estimating rotor slots», US patent 8131482 B2, filed November 11th, 2008, published November 19th, 2009.

3. Bin Lu, Santosh Kumar Sharma, Ting Yan, Steven Andrew Dimino, «System and method of speed detection in an ac induction machine», US patent 20140009102 A1, filed September 10th, 2013, published January 9th, 2014.

4. Скляр, А. В. Сравнительный анализ методов оценки скорости вращения ротора асинхронного двигателя по спектру потребляемого тока / А. В. Скляр, С. Н. Чижма // Известия Транссиба. — 2016. — № 1 (25). — С. 70–80.

5. Альтман, Е. А. Совершенствование алгоритма определения параметров гармоник сигналов в электрической сети для оценки качества электроэнергии / Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров, С. Н. Чижма // Электротехнические комплексы и системы управления. — 2012. — № 4 (28). — С. 5–9.

6. Альтман, Е. А. Повышение точности оценки параметров сигналов в электрической сети в системе тягового электрооборудования / Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров // Известия Транссиба. — 2012. — № 3 (11). — С. 95–100.

ЧИЖМА Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой автоматки и систем управления.

СКЛЯР Андрей Владимирович, аспирант кафедры автоматки и систем управления.

ЕЛИЗАРОВ Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматки и систем управления.

Адрес для переписки: chizhmasn@omgups.ru

Статья поступила в редакцию 12.04.2016 г.

© С. Н. Чижма, А. В. Скляр, Д. А. Елизаров

Книжная полка

Кривоногов, Н. А. Общая электротехника : учеб. пособие / Н. А. Кривоногов. — Ростов н/Д. : Феникс, 2016. — 222 с. — ISBN 978-5-222-25720-3.

В учебном пособии рассматриваются общие методы анализа линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей при постоянных, переменных и переходных токах и напряжениях, электрические машины, основы электропривода и электрических измерений. Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по электротехническим направлениям подготовки бакалавров технических вузов.

Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. — 11-е изд., перераб. и доп. — М. : Юрайт, 2015. — 320 с. — ISBN 978-5-9916-3176-1.

Рассмотрены традиционные и появившиеся за последние годы новые вопросы теории и методы расчета физических процессов в электрических, магнитных и электромагнитных полях, предусмотренные программой курса ТОЭ. К числу традиционных разделов курса относятся: постоянное во времени электрическое поле в диэлектрике и проводящих средах, постоянное во времени магнитное поле, переменное электромагнитное поле в диэлектрике, проводящей и полупроводящей средах, изучение электромагнитных волн, волны в направляющих системах, объемные резонаторы, моделирование полей, метод конформных преобразований, метод Грина, движение заряженных частиц в электромагнитных полях и др. К числу нетрадиционных разделов — основные положения магнитной гидродинамики, электродинамика движущихся сред, сверхпроводящие среды в электромагнитных полях, волны в гиротропных средах, метод интегральных уравнений, метод конечных элементов и др. По всем главам даны примеры с подробными решениями. В конце каждой главы — вопросы и задачи для самопроверки. Соответствует федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования третьего поколения. Для студентов и преподавателей высших учебных заведений технического профиля.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ С УСТРОЙСТВАМИ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Рассмотрены особенности и способы измерения тока нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю в сетях среднего напряжения. Рассмотрена классификация трансформаторов тока нулевой последовательности. Проведен анализ и представлены результаты экспериментов по использованию различных типов специальных трансформаторов тока нулевой последовательности для определения поврежденного присоединения при однофазном замыкании на землю в сетях среднего напряжения. Сформулированы рекомендации по применению трансформаторов тока нулевой последовательности с различными видами защит.

Ключевые слова: трансформатор тока нулевой последовательности, однофазное замыкание на землю, устройства для защиты от замыкания на землю, распределительные сети.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) наиболее часто возникающий вид повреждения в распределительных сетях среднего напряжения 6–35 кВ [1, 2]. Кроме того, ОЗЗ в течение времени могут перерасти в многофазные короткие замыкания.

При ОЗЗ в сети появляются ток нулевой последовательности и напряжение нулевой последовательности, которые могут быть измерены с использованием специальных трансформаторов. Значение тока нулевой последовательности может быть измерено с помощью трехтрансформаторного фильтра или специального трансформатора тока нулевой последовательности [3]. В сетях среднего напряжения могут использоваться различные способы заземления нейтрали, каждый из которых имеет свои особенности [4, 5].

В воздушных сетях с изолированной нейтралью напряжением 6–10 кВ значения тока нулевой последовательности очень малы и могут составлять сотые доли ампера. В таких случаях трехтрансформаторный фильтр использовать нецелесообразно, так как погрешности трансформаторов тока могут превышать значение тока нулевой последовательности. Для получения достоверной информации, как описано в [1–3], следует использовать специальные трансформаторы тока нулевой последовательности (ТТНП).

Для определения поврежденного присоединения при ОЗЗ часто применяют токовые или направленные защиты нулевой последовательности [6–8],

при этом последние могут быть относительно замера, когда сравниваются сигналы тока и напряжения всех отходящих присоединений.

Для точной настройки защит необходимо учитывать характеристики используемых ТТНП. В случае применения направленных защит следует учитывать также угловые погрешности трансформаторов тока. Кроме того, для корректной работы необходимо выполнять требования к монтажу и подключению кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности [9].

В настоящее время производятся различные типы ТТНП, которые отличаются формой, габаритами и областью применения. Например, такие как ТЗАМ-1, ТЗА-1.05.1, ТЗАК-05.1 (неразъемные для установки на кабель), ТЗРА (разъемные для установки на кабель), ТЗАМ-600 (круглой формы для установки в шкафы КРУ), ТЗАМ-100, ТЗАМ-250, ТЗАМ-300 (прямоугольной формы для установки в шкафы КРУ).

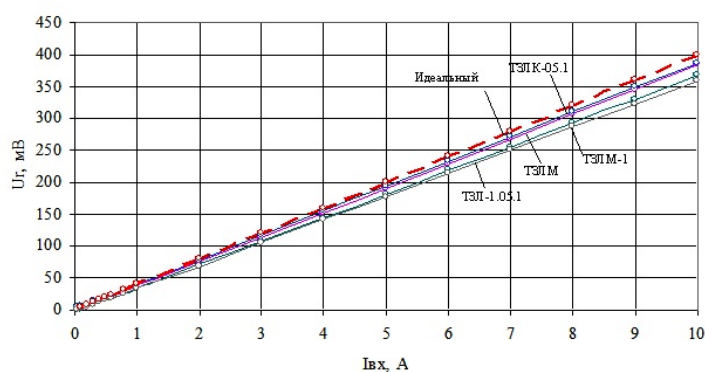
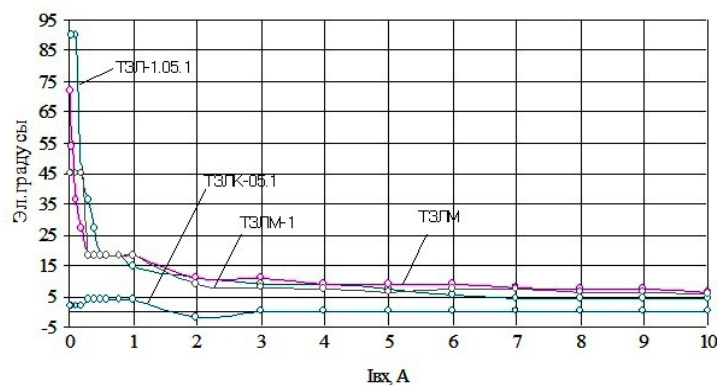
Общая классификация трансформаторов тока нулевой последовательности приведена на рис 1.

Некоторые производители устройств релейной защиты применяют ТТНП, разработанные для использования с конкретным видом защит. Так, для подключения к защитах Seram применяются трансформаторы тока CSH 120, CSH 200 (для установки на кабель).

Большинство производителей устройств защиты и сигнализации от ОЗЗ используют серийно



Рис. 1. Классификация трансформаторов тока нулевой последовательности

Рис. 2. Зависимость U_t от $I_{вх}$, $R_H = 1$ Ом. Диапазон $I_{вх}$ от 0 до 10 АРис. 3. Сдвиг фаз между $I_{вх}$ и $I_{вых}$, $R_H = 1$ Ом. Диапазон $I_{вх}$ от 0 до 10 А

выпускаемые ТТНП для подключения своих устройств. При этом, в зависимости от типа трансформатора и места его установки, при работе устройств могут возникать различные особенности [10, 11], а в некоторых ситуациях — ошибки при работе устройств защиты и сигнализации от ОЗЗ.

На подстанциях 35/6(10) кВ, кроме кабельных отходящих линий, могут присутствовать воздушные. Часто данный вид отходящих линий встречается на подстанциях 6–10 кВ в сельской местности и на объектах нефтедобычи. Шкафы КРУ с воздушными отходящими линиями имеют другую конструкцию, в которой в большинстве случаев не предусмотрена установка ТТНП. На таких объектах устанавливаются трансформаторы тока спе-

циальной формы с окном большого диаметра либо прямоугольной формы. Известны также альтернативные способы измерения тока на подстанциях с воздушными отходящими линиями с помощью кабельных ТТНП и специальных кабельных вставок [12].

Для настройки защит от ОЗЗ необходимо учитывать характеристики ТТНП. В большинстве случаев производители приводят не все характеристики ТТНП, что вызывает сложности в их применении для направленных и других видов защит. Также не приводятся данные о передаче трансформатором гармоник тока, что не позволяет оценить возможность их использования с устройствами, анализирующими гармоники в сигнале тока нулевой последовательности.

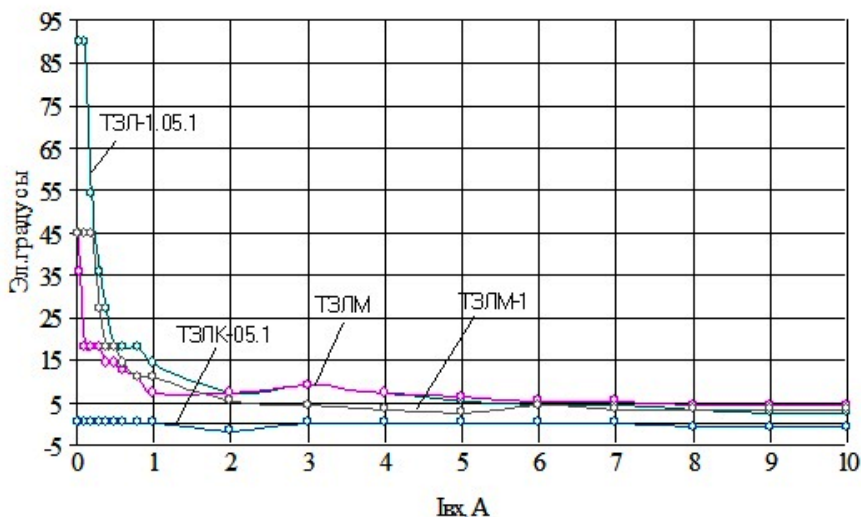


Рис. 4. Сдвиг фаз между $I_{вх}$ и $I_{вых}$, $R_H = 0,5$ Ом. Диапазон $I_{вх}$ от 0 до 10 А

В [13] получены зависимости угловой погрешности ТТНП типа ТЗЛМ при значениях нагрузки 0,5 и 0,2 А; в [14] приведены измерения параметров трансформаторов тока ТЗЛМ, ТЗЛ-1.05.1, ТЗЛК-05.1, ТЗЛМ-1, получены графики зависимостей напряжения на резисторе нагрузки от входного тока (при сопротивлениях нагрузки 1; 0,5; 0,2 Ом), сдвиг фаз между входным и выходным сигналом. U_r — напряжение на резисторе нагрузки, $I_{вх}$ — ток на входе ТТНП, $I_{вых}$ — ток на выходе ТТНП.

Из представленных диаграмм (рис. 2–4) видно, что при значениях тока менее 0,5 А для некоторых типов ТТНП угол сдвига фаз может достигать больших значений и зависит от сопротивления нагрузки.

Выводы.

1. Большинство серийно выпускаемых ТТНП предназначены для подключения к токовым защитам и имеют ограничения в части применения с направленными защитами нулевой последовательности из-за больших углов сдвига фаз при малых значениях тока.

2. Для оценки возможности использования производимых ТТНП с различными видами защит необходимо приводить более подробные характеристики с учетом углов сдвига фаз между входным и выходным сигналом для конкретного вида нагрузки.

3. Ввиду отсутствия положительного опыта работы актуальным вопросом является разработка и производство ТТНП для установки в шкафы КРУ и подключения направленных защит нулевой последовательности.

Библиографический список

- Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем : учеб. для вузов / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1992. — 528 с.
- Цапенко, Е. Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ : учеб. для вузов / Е. Ф. Цапенко. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 128 с.
- Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : учеб. для вузов / В. А. Андреев. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 2007. — 639 с.
- Евдокунин, Г. А. Возможные способы заземления нейтрали сетей 6–10 кВ / Г. А. Евдокунин // Новости электротехники. — 2003. — № 6 (24). — С. 17–19.
- Целебровский, Ю. В. Области применения различных систем заземления нейтрали / Ю. В. Целебровский // Новости электротехники. — 2004. — № 5 (29). — С. 17–20.
- Титенков, С. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ / С. Титенков // Новости электротехники. — 2005. — 3 (33). — С. 52–55.
- Шалин, А. И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ / А. И. Шалин // Новости электротехники. — 2005. — 5 (35). — С. 50–54.
- Шалин, А. И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ / А. И. Шалин // Новости электротехники. — 2005. — 6 (36). — С. 52–55.
- Беркович, М. А. Релейная защита электроэнергетических систем : учеб. для вузов / М. А. Беркович, В. В. Молчанов, В. Л. Семенов. — 6-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 376 с.
- Батулько, Д. В. Применение датчиков тока ТДЗЛВ-10 в устройствах для определения поврежденной воздушной линии электропередачи / Д. В. Батулько // Энергетик. — 2005. — № 12. — С. 43.
- Батулько, Д. В. Исследование датчиков тока ТДЗЛВ-10 и трансформаторов тока ТЗЛМ на помехоустойчивость при воздействии внешнего магнитного поля / Д. В. Батулько // Энергетик. — 2006. — № 6. — С. 44–45.
- Пат. 2255404 Российская Федерация, МПК Н 02 Н. Устройство для определения однофазных замыканий на землю в воздушных сетях с изолированной нейтралью / Батулько Д. В. ; заявитель и патентообладатель ООО «Компания «МИР». — № 2003127805 ; заявл. 15.09.03 ; опубл. 20.01.05.
- Олейник, С. И. Разработка защиты от однофазных замыканий, селективной в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Олейник Сергей Иванович ; ОмГТУ. — Омск, 2004. — 22 с.
- Батулько, Д. В. Определение поврежденной воздушной линии с однофазным замыканием на землю в сети с изолированной нейтралью : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Батулько Дмитрий Васильевич ; Омский гос. техн. ун-т. — Омск, 2007. — 165 с.

БАТУЛЬКО Дмитрий Васильевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий.
Адрес для переписки: batulkodv@mail.ru

НИКИТИН Константин Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий; заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники.
Адрес для переписки: 3dogibmod@mail.ru
ВЛАДИМИРОВ Леонид Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.
Адрес для переписки: leha.vlad86@mail.ru

БИГУН Александр Ярославович, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Адрес для переписки: barsbigun@list.ru

Статья поступила в редакцию 13.04.2016 г.

© Д. В. Батулько, К. И. Никитин, Л. В. Владимиров,
А. Я. Бигун

УДК 621.3.07

**Д. С. ОСИПОВ
С. Ю. ДОЛИНГЕР
Д. Г. САФОНОВ**

Омский государственный
технический университет

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ НА ОСНОВЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ

В статье представлен обзор существующих методов настройки компенсации емкостных токов при изменении конфигурации сети. В качестве оптимальных методов для предварительной настройки компенсации в нормальном режиме работы предложено использовать фазовый или амплитудный (экстремальный), а для настройки в режиме замыкания на землю — фазовый, частотный. Для автоматической подстройки дугогасящего реактора разработан новый алгоритм с использованием вейвлет-преобразования кривой напряжения контура нулевой последовательности.

Ключевые слова: дугогасящий реактор, компенсация емкостных токов, автоматическая настройка, однофазное замыкание на землю, вейвлет-преобразование.

Режим работы нейтрали определяет ряд важных характеристик электрической сети среднего напряжения (6–35 кВ), среди которых надежность электроснабжения потребителей, безопасность людей, находящихся вблизи места однофазного замыкания на землю, уровень изоляции электротехнического оборудования и т.д. Одним из способов повышения надежности работы распределительных сетей среднего напряжения является заземление нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), основное преимущество которого — возможность продолжительной работы сети при наличии однофазного замыкания на землю без отключения потребителей. Все преимущества заземления нейтрали через ДГР можно реализовать только при его плавной автоматической настройке в резонанс [1]. При этом перенапряжения при однофазных замыканиях на землю не превышают допустимых значений, ток в месте повреждения не вызывает существенных нарушений в работе оборудования. Следовательно, нет необходимости мгновенного отключения потребителя. Поскольку емкостный ток меняется в зависимости от режима работы сети, резонанс можно

поддерживать только автоматически, используя плавно регулируемые ДГР и автоматическую систему управления.

Существующие методы определения емкостного тока замыкания на землю классифицируются следующим образом: по модели сети; по реактивным проводимостям; по фазовым характеристикам; по амплитудным (экстремальным) характеристикам; по частотным параметрам; по постоянной времени восстановления напряжения поврежденной фазы; по соотношению величин параметров нулевой последовательности сети [2–11].

Представленные методы являются косвенными, поскольку место замыкания фазы в сети не определено и ток в точке замыкания не может быть непосредственно измерен. Косвенные методы определения обладают некоторой погрешностью, которая может быть оценена в каждом отдельном случае.

По модели сети. Каждый участок сети моделируется с соответствующими параметрами, а определение емкостного тока проводится с учетом его текущей конфигурации [2]. Недостатком этого метода является высокая погрешность настройки

компенсации, вызванная изменением параметров отдельных участков сети от первоначального значения и отклонением частоты, а также сложность передачи информации о состоянии сети по каналам телеуправления.

По реактивным проводимостям. Определение емкостного тока замыкания на землю осуществляется на основе измерений полной реактивной проводимости контура нулевой последовательности (КНП) сети, емкостной проводимости или по разности емкостной проводимости сети и проводимости реактора [3–5].

От внешнего источника питания подается напряжение в нейтраль сети, которое прикладывается к КНП. Источник питания включается через трансформатор подпитки параллельно или последовательно ДГР или же на его вторичную обмотку. Параметры трансформатора должны быть такими, чтобы при переходе от нормального режима работы сети к режиму однофазного замыкания резонансная настройка компенсации изменялась незначительно. Режим замыкания на землю определяется по напряжению нулевой последовательности.

При несимметрии фазных проводимостей сети на ток вспомогательного источника питания накладывается дополнительный ток и возникают биения, поэтому частота источника немного отличается от основной (как правило, на 2 %) [2]. Измеряется полная реактивная проводимость КНП:

$$b = \frac{I_{ucm}}{U_{ucm}} \sin \varphi, \quad (1)$$

где I_{ucm} и U_{ucm} — ток и напряжение вспомогательного источника;

φ — угол между ними.

Изменение компенсирующего тока происходит пропорционально изменению проводимости.

Основные недостатки данного способа: в нормальном режиме работы сети при значительной несимметрии фазных проводимостей относительно земли не может быть проведена резонансная настройка ДГР; чувствительность устройства зависит от емкости сети — и могут возникнуть автоколебания, что приводит к увеличению погрешности настройки и ограничивает использование ДГР с изменяемым воздушным зазором; низкая помехоустойчивость.

Рассмотрим метод на основе измерения емкостной проводимости сети [4, 5]. В этом случае в нейтраль сети, например через вторичную обмотку ДГР, вводится напряжение промышленной частоты.

Емкостная проводимость сети относительно земли на промышленной частоте b_C пропорциональна измеряемой проводимости:

$$b_C = \frac{\omega}{\omega_0} b_{C0}, \quad (2)$$

где b_{C0} — емкостная проводимость сети, измеряемая на промышленной частоте;

ω — угловая частота сети;

ω_0 — угловая частота источника питания.

При повышенной частоте емкостную проводимость определяют по значению тока источника питания или тока в нейтрали сети, затем измеряют индуктивность реактора и настраивают его [5]. Индуктивность (ток, проводимость) реактора может определяться с помощью соответствующего датчи-

ка (потенциометр, сельсин и т.д.) или же специальных устройств измерения и преобразования.

Недостатком данного метода является влияние сопротивления изоляции сети (в основном в сетях напряжением 0,4 кВ) на точность настройки компенсации и наличие дополнительного источника питания. К тому же этот метод не может быть использован в сетях с высоким уровнем несимметрии. В сетях же с большой несимметрией фазных проводимостей относительно земли может выполняться при подключении ДГР к нейтрали сети через быстродействующий коммутатор и раздельном измерении емкости сети и индуктивности реактора [2]. Использование данного принципа позволит производить настройку ДГР как в нормальном режиме работы сети, так и при замыкании на землю. Точность настройки компенсации зависит от погрешности при измерении I_p и C_0 и регулировании индуктивности ДГР.

Недостатком данного способа является неустойчивая работа при перемежающихся дугах [2]. В таком режиме настройку компенсации можно выполнить по частоте свободных колебаний в КНП сети. При этом устройство должно иметь дополнительный источник питания.

По фазовым характеристикам. В системах, работающих по фазовому принципу регулирования, в нормальном режиме работы сети измеряют фазу напряжения (тока) нейтрали по отношению к опорному напряжению, а в режиме замыкания — напряжения поврежденной фазы сети. Для повышения точности настройки компенсации по фазовому принципу необходимо создать искусственную несимметрию проводимостей сети либо подключить к сети источник опорного напряжения [2, 6, 7].

Устройства компенсации на фазовом принципе в простейших случаях могут быть созданы на основе измерения фазы напряжения нейтрали φ_n . При постоянном значении φ_0 , т.е. постоянной несимметрии сети, фаза напряжения нейтрали φ_n практически определяется расстройкой компенсации. При точной настройке исключается также влияние активных потерь сети, поэтому для повышения точности настройки устройства должны иметь высокую чувствительность по углу φ_n , минимальную постоянную времени системы авторегулирования и плавное изменение индуктивности реактора.

В реальных сетях, в том числе кабельных, фаза напряжения изолированной сети φ_0 при неизменном значении емкостного тока значительно изменяется, что вносит погрешность в систему автоматической настройки компенсации. Уменьшение влияния φ_0 на точность настройки компенсации достигается искусственным смещением нейтрали путем подключения небольшой емкости к одной из фаз сети или введением в ее нейтраль источника промышленной частоты [2, 6, 7].

Напряжение нейтрали изолированной сети при искусственном смещении нейтрали определяется выражением

$$\dot{U}_{n,u} = \dot{U}_0 - \dot{U}_{nC}, \quad (3)$$

где \dot{U}_{nC} — составляющая напряжения нейтрали, вызванная включением дополнительной емкости.

При выборе емкости и фазы подключения конденсатора и оценке погрешности настройки компенсации необходимо учитывать уровень напряжения нейтрали. В резонансном режиме настройки компенсации напряжение нейтрали не должно превышать допустимого ($0,15 U_{\phi}$).

Для практических целей напряжение нейтрали компенсированной сети при подключении дополнительной емкости (Δc) к одной из фаз может определяться выражением

$$U_n = QU_{нн} \leq 0,15 \cdot U_{\phi}, \quad (4)$$

где Q — добротность сети, определяемая по выражению

$$Q = U_{нрез} / U_{\phi}, \quad (5)$$

где $U_{нрез}$ — напряжение нейтрали при резонансной настройке ДГР (без Δc).

Данный способ при настройке ДГР в нормальном режиме работы сети может быть использован в сетях с незначительной несимметрией, а при настройке только в режиме замыкания на землю (при металлическом замыкании и непрерывном горении заземляющей дуги) — в сетях с большой несимметрией фазных проводимостей относительно земли. При перемежающей дуге устройство блокируется.

К недостаткам настройки компенсации по фазовому принципу можно отнести искусственное смещение нейтрали и влияние на точность настройки активных потерь в сети.

По амплитудным (экстремальным) характеристикам. В устройствах настройки компенсации по экстремальным характеристикам сети (в нормальном режиме ее работы) определяют экстремум напряжения нейтрали или тока дополнительного источника не промышленной частоты, вводимого в нейтраль сети, а при замыкании на землю — минимум напряжения поврежденной фазы. Известны системы настройки компенсации с использованием экстремальных характеристик КНП сети и контура «заземляющий трансформатор — сеть» [6, 11].

Экстремальное регулирование заключается в минимизации расстройки компенсации путем управления индуктивностью ДГР:

$$u(t) = 1 - K(t), \quad (6)$$

где $K(t)$ — коэффициент настройки компенсации.

Напряжение нейтрали определяется по формуле:

$$U_n = \frac{U_0}{\sqrt{K^2(d_k^2 + 1) - 2K + 1}}, \quad (7)$$

где U_n, U_0 — относительные величины, отнесенные к напряжению фазы; d_k — коэффициент демпфирования сети с изолированной нейтралью.

После дифференцирования и элементарных преобразований получим

$$\frac{dU_n}{d_k} = \frac{U_0(K(d_k^2 + 1) - 1)}{(K^2(d_k^2 + 1) - 2K + 1)^{3/2}}. \quad (8)$$

Экстремальному значению U_n соответствует $K = 1/(d_k^2 + 1)$, а при пренебрежении составляющей $d_k^2 \ll 1$ коэффициент настройки равен $K = 1$.

Экстремальное значение напряжения нейтрали ($K = 1$) можно также определить по формуле

$$U_n = \frac{U_0}{(d + p)}. \quad (9)$$

В области недокомпенсации ($0 < K < 1$) производная $dU_n/dI_p > 0$, в области перекомпенсации ($1 < K < 2$)

производная $dU_n/dI_p < 0$, а в точке экстремума $dU_n/dI_p = 0$. Таким образом, по приращению напряжения нейтрали (по производной) можно вести автоматическую настройку компенсации.

Для повышения эффективности данного метода предлагают в качестве источника не промышленной частоты использовать периодический разряд на сигнальную обмотку предварительно заряжаемого конденсатора [8]. Сигнал, прямо пропорциональный емкости фаз сети, получают с помощью амплитудного детектора на выходе дифференцирующего звена, подключенного к выходу обмотки трансформатора напряжения, соединенной в открытый треугольник.

Экстремальный (амплитудный) принцип с настройкой при отсутствии замыкания на землю применяется в сетях с незначительной и повышенной несимметрией, например в воздушных сетях напряжением 35 кВ, где при резонансной настройке ДГР напряжение нейтрали не превышает $0,15 U_{\phi}$. В сетях, в которых напряжение нейтрали превышает допустимое значение, экстремальный принцип может использоваться в режиме металлического замыкания на землю и при стационарной дуге.

Основным преимуществом экстремального регулирования является использование токов и напряжений нулевой последовательности без введения в сеть дополнительного источника питания.

К недостаткам способа по экстремальному принципу следует отнести влияние на точность настройки активных потерь в КНП, снижение чувствительности измерительного устройства при значительной расстройке компенсации.

По соотношению величин параметров нулевой последовательности сети. При автоматической настройке компенсации по отношению величин в сеть вводят источник тока не промышленной частоты (как правило, кратной основной), а настройку осуществляют по отношению тока или напряжения не промышленной частоты на ДГР к вводимому напряжению. Если источник не промышленной частоты подключают параллельно реактору, то настройку ведут по отношению токов не промышленной частоты, протекающих через источник и нейтраль сети [2].

Данный принцип также позволяет осуществить контроль настройки компенсации и селективную сигнализацию замыканий на землю. В устройствах автоматической настройки компенсации по данному принципу в качестве источника тока используется электромагнитный параметрический делитель частоты [2].

По частотным параметрам. Используя этот метод настройки, измеряют частоту свободных колебаний в КНП сети при естественных и искусственных переходных процессах или при принудительной модуляции одного из параметров КНП сети [2, 6, 9].

Резонансный контур, образованный индуктивностью ДГР и емкостями фаз относительно земли, характеризуется двумя важнейшими параметрами: частотой собственных колебаний ω_c и коэффициентом их затухания δ .

Согласно [2] связь между коэффициентом расстройки компенсации v и частотой собственных колебаний контура ω_c без учета активных потерь в контуре определяется выражением

$$\omega_c = \omega \sqrt{1 - v}. \quad (10)$$

При расстройке $v = 1$ (при отключенном ДГР) частота собственных колебаний стремится к нулю.

При точной настройке компенсации $\nu=0$ собственная частота контура равна частоте источника ЭДС в сети, т.е. 50 Гц, а при перекомпенсации $\nu=-1$ частота собственных колебаний достигает 70 Гц.

Сравнительно высокая точность измерения расстройки, являющаяся принципиальной особенностью рассмотренного способа, и простота технической реализации привлекли внимание разработчиков [2, 3].

При обрыве заземляющей дуги в контуре происходит колебательный обмен энергией между ДГР и емкостью сети с собственной частотой ω_c . В это же

время измеряют частоту напряжения нейтрали U_n , содержащую информацию о расстройке компенсации, и изменяют индуктивность ДГР до тех пор, пока частота собственных колебаний не совпадет с 50 Гц.

Разработка алгоритма настройки дугогасящего реактора. На основании проведенного выше обзора способов автоматической подстройки ДГР был разработан новый алгоритм с использованием вейвлет-преобразования кривой напряжения КНП.

Для автоматической подстройки ДГР необходимо следовать алгоритму (рис. 1).

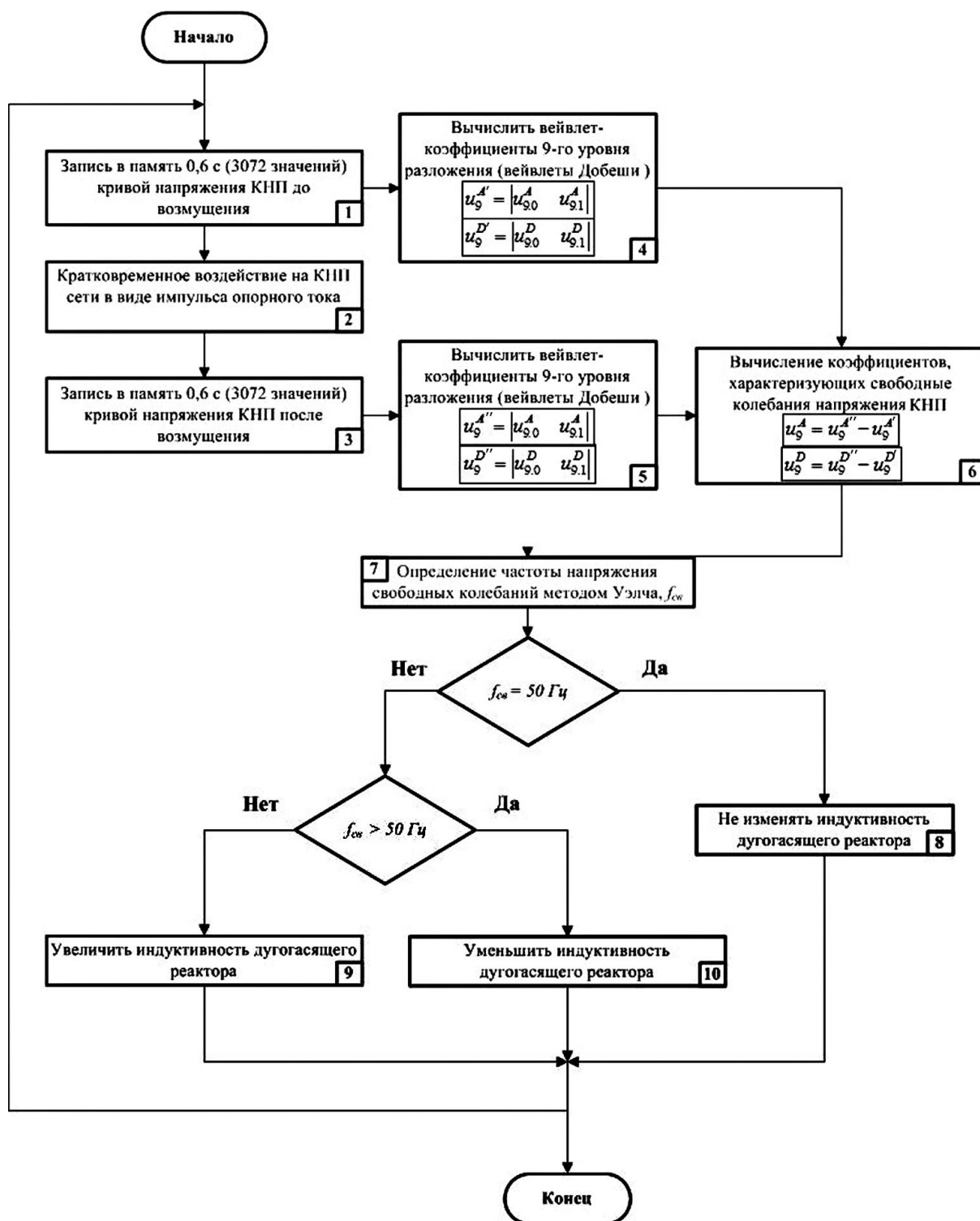


Рис. 1. Алгоритм автоматической подстройки дугогасящего реактора

1. На первоначальном шаге необходимо в буфер памяти записывать кривую напряжения КНП длительностью 0,6 секунд, что составляет 3072 значения.

2. Для создания переходного процесса в КНП необходимо кратковременное воздействие на него в виде импульса опорного тока.

3. После создания возмущения в буфер памяти записывается кривая напряжения КНП длительностью 0,6 секунд (3072 значения).

4. На этом шаге необходимо вычислить вейвлет-коэффициенты 9-го уровня разложения из фрагмента напряжения до управляющего воздействия. Обозначим полученные коэффициенты с индексом «'» (штрих):

$$u_9^{A'} = |u_{9,0}^A \quad u_{9,1}^A|, \quad (11)$$

$$u_9^{D'} = |u_{9,0}^D \quad u_{9,1}^D|, \quad (12)$$

где $u_9^{D'}$ — детализирующий вейвлет-коэффициент 9-го уровня до управляющего воздействия;

$u_9^{A'}$ — аппроксимирующий коэффициент 9-го уровня до управляющего воздействия.

5. Аналогичным образом вычислить коэффициенты 9-го уровня разложения из фрагмента напряжения после управляющего воздействия. Обозначим полученные коэффициенты с индексом «''» (два штриха):

$$u_9^{A''} = |u_{9,0}^A \quad u_{9,1}^A|, \quad (13)$$

$$u_9^{D''} = |u_{9,0}^D \quad u_{9,1}^D|, \quad (14)$$

где $u_9^{D''}$ — детализирующий вейвлет-коэффициент 9-го уровня после управляющего воздействия;

$u_9^{A''}$ — аппроксимирующий коэффициент 9-го уровня после управляющего воздействия.

6. Коэффициенты, характеризующие свободные колебания напряжения КНП, могут быть определены через разность:

$$u_9^A = u_9^{A''} - u_9^{A'}, \quad (15)$$

$$u_9^D = u_9^{D''} - u_9^{D'}. \quad (16)$$

Искомая функция напряжения свободной составляющей КНП в этом случае может быть записана через вейвлет-коэффициенты:

$$u_{св}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \cdot \psi_{j,k}(t), \quad (17)$$

или, учитывая, что в алгоритме используем только коэффициенты $u_9^D(k)$ и $u_9^A(k)$, на основании (8), (9) формула (10) может быть переписана в виде

$$u_{св}(t) = u_{9,0}^A \varphi_{9,0} + u_{9,1}^A \varphi_{9,1} + u_{9,0}^D \psi_{9,0} + u_{9,1}^D \psi_{9,1}, \quad (18)$$

где ψ_{jk} — базисная функция, сдвинутая во времени k и измененная по временному масштабу 2^j .

7. Определение частоты напряжения свободных колебаний методом Уэлча [6]. После определения частоты $f_{св}$ происходит ее сравнение.

8. Если частота свободных колебаний КНП равна 50 Гц, то изменить индуктивность ДГР не требуется.

9. В случае если частота $f_{св}$ меньше 50 Гц, то необходимо увеличить индуктивность ДГР.

10. В ином случае — необходимо уменьшить индуктивность ДГР.

В дальнейшем алгоритм повторяется.

В заключение стоит отметить основные отличия предлагаемого алгоритма от ранее известных:

1. В основе алгоритма лежит новый математический аппарат дискретного вейвлет-преобразования, представляющий информацию не только в амплитудно-частотном диапазоне, но и в частотно-временном.

2. Кратно масштабный вейвлет-анализ позволяет исключить из сигнала напряжения КНП высокочастотные помехи и искажения.

3. После вейвлет-преобразования сигнала напряжения в дальнейшей работе алгоритма участвуют аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты размерностью на порядок меньше, чем размерность исследуемого сигнала напряжения. Так, для 9-го уровня дискретного вейвлет-преобразования матрицы коэффициентов имеют размерность $[1 \times 2]$, т.е. значительно сокращается объем памяти для хранения информации.

4. Непараметрический метод Уэлча, используемый для нахождения частоты свободных колебаний, показывает хорошие результаты в условиях нестационарности режима, поскольку применяется для спектрального анализа случайных процессов.

Библиографический список

- Сафонов, Д. Г. Определение напряжения нулевой последовательности с учетом естественной несимметрии параметров воздушной линии электропередачи / Д. Г. Сафонов, В. А. Ощепков, С. С. Гиршин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2016. — № 1 (145). — С. 58–60.
- Сирота, И. М. Режимы нейтрали электрических сетей / И. М. Сирота, С. Н. Кисленко, А. М. Михайлов. — Киев : Наукова думка, 1985. — 264 с.
- Всерезимный регулятор автоматической настройки дугогасящих катушек в кабельных сетях 6–35 кВ / В. Ф. Степанчук [и др.] // Электрические станции. — 1978. — № 9. — С. 65–68.
- Гиря, В. И. Классификация систем автоматического регулирования настройки дугогасящих реакторов / В. И. Гиря, О. А. Петров // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий : темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т им. Ленинского комсомола. — 1977. — № 196. — С. 189–193.
- Гиря, В. И. Автоматическая настройка компенсации емкостных токов / В. И. Гиря, О. А. Петров // Электрические станции. — 1977. — № 3. — С. 80–83.
- Миронов, И. А. Дугогасящие реакторы в сетях 6–35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока / И. А. Миронов // Новости электротехники. — 2007. — № 5 (47). — Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/47/06.php> (дата обращения: 12.04.2007).
- Миронов, И. А. Особенности применения дугогасящих реакторов / И. А. Миронов, В. А. Кричко // Новости электротехники. — 2007. — № 1 (43). — Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/43/07.php> (дата обращения: 12.04.2007).
- Пат. 2148833 РФ, МПК G 01 R 27/18, G 01 R 27/26. Устройство быстродействующей селективной защиты от однофазных замыканий на землю в распределительных сетях с возможностью безаварийного ввода резерва / Брянцев А. М., Брянцев М. А., Долгополов А. Г., Долгополов С. Г.; заявитель и патентообладатель Научно-технический центр Всерос. элек-

тротех. ин-та им. В. И. Ленина. — № 2009108827/07 ; заявл. 26.10.1998 ; опубл. 10.05.200, Бюл. № 30.

9. Козлов, В. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Реализация метода автоматического управления / В. Козлов, В. Ильин // Новости электротехники. — 2008. — № 2 (50). — Режим доступа : <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/50/12.php> (дата обращения: 13.04.2008).

10. Druml, G. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Повышение точности настройки / G. Druml, A. Kugi, B. Parag // Новости ЭлектроТехники. — 2007. — № 1 (43). — Режим доступа : <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/43/08.php> (дата обращения: 13.04.2007).

11. Druml, G. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Новый метод определения параметров сети / G. Druml, O. Seiferd // Новости электротехники. — 2007. — № 2 (44). — Режим доступа : <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/44/07.php> (дата обращения: 22.08.2007).

ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Адрес для переписки: ossipovdmitriy@list.ru

ДОЛИНГЕР Станислав Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Адрес для переписки: dolingersy@gmail.com

САФОНОВ Дмитрий Геннадьевич, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Адрес для переписки: SafonovDG@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.04.2016 г.

© Д. С. Осипов, С. Ю. Долингер, Д. Г. Сафонов

УДК 621.317.384:621.315

**Д. С. ОСИПОВ
Д. В. КОВАЛЕНКО
Б. Ю. КИСЕЛЁВ**

Омский государственный
технический университет

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ НАЛИЧИИ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ МЕТОДОМ ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В статье рассматривается система электроснабжения (СЭС) при нестационарном режиме работы электроприемников. Нелинейные нагрузки являются источниками высших гармоник (ВГ). Произведен расчет токов, потерь мощности и энергии отдельно для каждой гармоники различными методами: по действующим значениям токов отдельных гармоник за известный промежуток времени и методом пакетного вейвлет-разложения сигнала тока. Сопоставлены результаты значений потерь энергии, полученных различными методами, и рассчитаны значения погрешностей в определении потерь энергии.

Ключевые слова: система электроснабжения, высшие гармоники, преобразование Фурье, вейвлет-разложение, вейвлет-коэффициенты.

В настоящее время в энергетике актуальными являются исследования, направленные на уменьшение потерь в электрических сетях [1–5]. В данной работе проводится расчет потерь энергии в линии электропередачи (ЛЭП), представленной на рис. 1.

К секции шин 0,4 кВ исследуемой системы электроснабжения (рис. 1а) подключены электроприемники, имеющие различные режимы работы. Через автоматический выключатель SF1 подключен электроприемник, работающий с продолжительно неизменной нагрузкой. От выключателей SF2 и SF3 питаются электроприемники, работающие в режиме повторно-кратковременной нагрузки. Данный режим работы характеризуется коэффи-

циентом включения электроприемника в цикле t_b ко всей продолжительности цикла t_u . Время включения электроприемника за цикл складывается из времени работы t_p и времени холостого хода t_x :

$$k_e = \frac{t_e}{t_u} = \frac{t_p + t_x}{t_u} \quad (1)$$

Для расчета режима СЭС с целью определения функции тока в кабельной линии воспользуемся принципом наложения и для СЭС (рис. 1а) составим схемы замещения для основной частоты (рис. 1б) и для ВГ (рис. 1в). Параметры электрооборудования для расчета режима представлены в табл. 1.

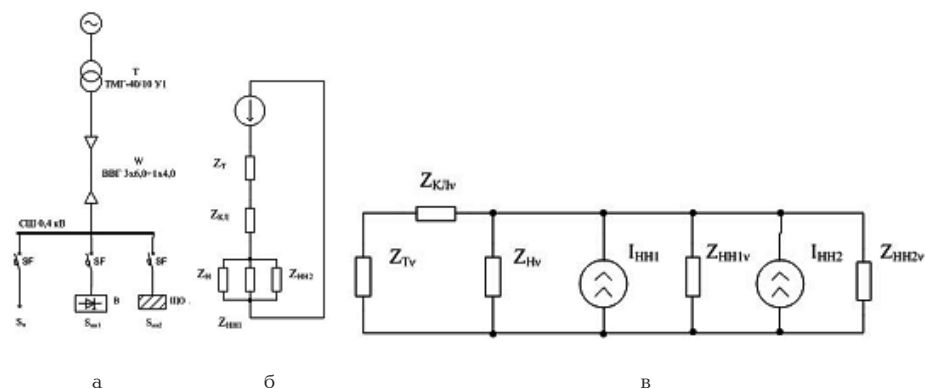


Рис. 1. СЭС (а), схемы замещения СЭС на основной (б) и высших (в) гармониках

Таблица 1

Паспортные данные трансформатора и кабеля

Трансформатор ТМГ-40/10 У1						
$S_{ном}'$, кВА	$U_{кз}'$, %	I_{xx}' , %	P_{xx}' , кВт	$P_{кз}'$, кВт	$U_{вн}'$, кВ	$U_{нн}'$, кВ
40	4,7	3	0,17	0,88	10,5	0,38
Кабельная линия ВВГ 3 x 6,0 + 1 x 4,0						
r_0' , Ом/км		x_0' , Ом/км		$I_{ал.доп.}'$, А		
0,443		0,0612		180		

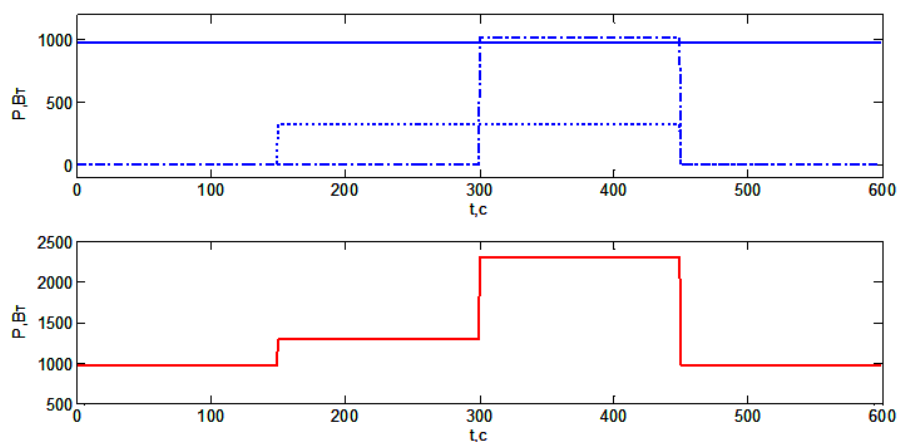


Рис. 2. График нагрузок СЭС

Сопротивления трансформатора могут быть определены как

$$R_m = \frac{P_{кз}' \cdot U_{нн}'^2}{S_{НОМ}^2} \cdot 10^3, \quad (2)$$

$$X_m = \frac{U_{кз}' \cdot U_{нн}'^2}{100 \cdot S_{НОМ}} \cdot 10^3, \quad (3)$$

где R_m , X_m — соответственно активное и индуктивное сопротивление трансформатора;
 $P_{кз}'$ — потери короткого замыкания;
 P_{xx}' — потери холостого хода;
 $U_{кз}'$ — напряжение короткого замыкания;

I_{xx} — ток холостого хода;

$U_{вн}'$, $U_{нн}'$ — соответственно напряжение на обмотках высшего и низшего напряжения трансформатора;

$S_{НОМ}$ — номинальная мощность трансформатора.

Кабельная линия:

$$R_{кЛ} = r_0 L, \quad (4)$$

$$X_{кЛ} = x_0 L, \quad (5)$$

где $R_{кЛ}$, $X_{кЛ}$ — соответственно активное и индуктивное сопротивление кабельной линии электропередачи;

Токи кабельной линии на высших гармониках

Токи кабельной линии			
I_3	I_5	I_7	I_9
13,652 + j33,98	22,813 + j46,133	23,982 + j36,853	6,421 + j7,826

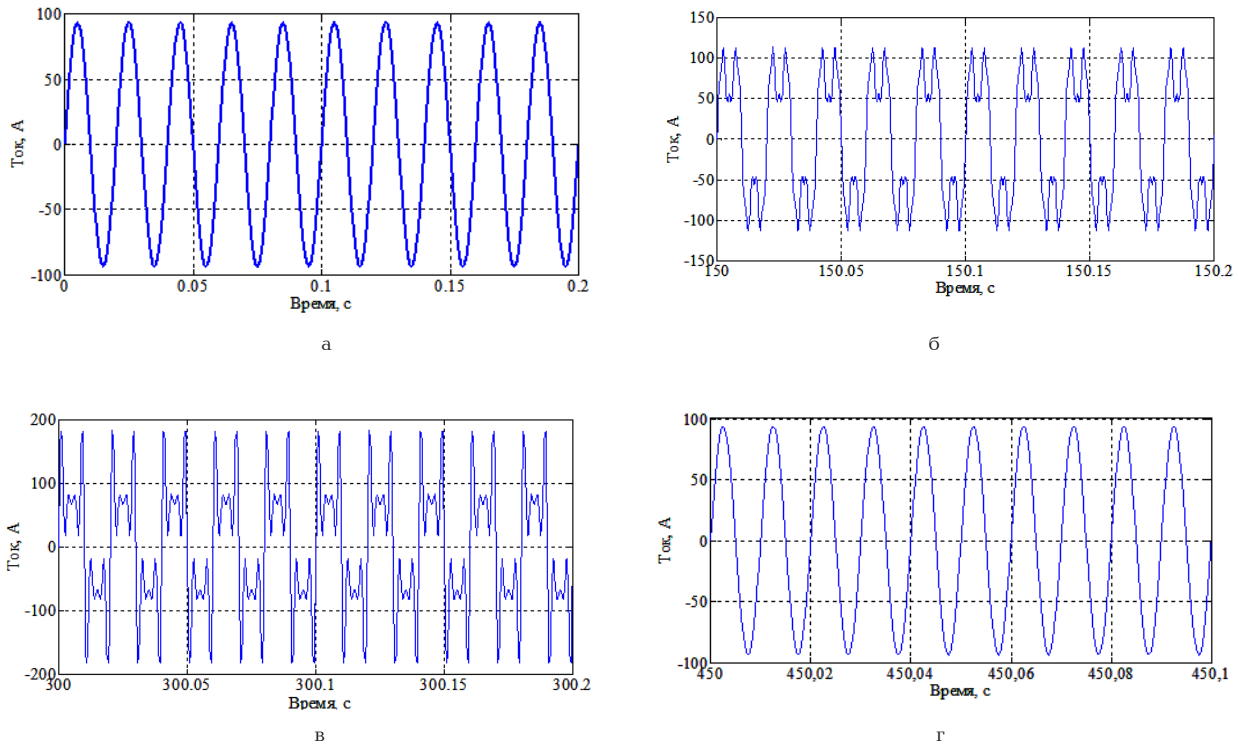


Рис. 3. Зависимости тока от времени на разных интервалах времени:

- а — $i_1(t) = I_1 \sin(\omega t)$; б — $i_2(t) = I_1 \sin(\omega t_2) + I_3 \sin(3\omega t_2) + I_9 \sin(9\omega t_2)$;
- в — $i_3(t) = I_1 \sin(\omega t_3) + I_3 \sin(3\omega t_3) + I_5 \sin(5\omega t_3) + I_7 \sin(7\omega t_3) + I_9 \sin(9\omega t_3)$; г — $i_4(t) = I_1 \sin(\omega t_4)$

r_0, x_0 — погонное активное и индуктивное сопротивление кабельной линии электропередачи;
 L — длина кабельной линии, км.

Увеличение реактивной (индуктивной) части комплексных сопротивлений на ВГ определяются по формуле

$$X_n = nX, \tag{6}$$

где n — номер гармоники.

Наличие источников тока (источников ВГ) в схеме (рис. 1в) определяется в соответствии с графиками электрических нагрузок (рис. 2).

По графику нагрузок для времени цикла $t_{ци} = 600$ с определяем коэффициент включения для вентиль-

ного преобразователя (В) $k_B = 0,25$ и облучательной установки с газоразрядными лампами (ЩО) $k_{ЩО} = 0,5$.

Вентильный преобразователь (В) и облучательная установка (ЩО) являются электроприемниками с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), а значит, источниками ВГ. Облучающая установка является источником 3 и 9 гармоник (150 и 450 Гц), спектр вентильного преобразователя представлен 5 и 7 гармониками (250 и 350 Гц), гармониками более высокого порядка преобразователя пренебрегаем.

В таком случае для анализа нестационарного режима работы СЭС, в соответствии с графиками электрических нагрузок, ток в кабельной линии может быть задан функцией времени:

$$i(t) = \begin{cases} I_{1m} \sin(\omega t) & 0 \leq t \leq 150(c) \\ I_{1m} \sin(\omega t) + I_{3m} \sin(3\omega t) + I_{9m} \sin(9\omega t) & 150 \leq t \leq 300(c) \\ I_{1m} \sin(\omega t) + I_{3m} \sin(3\omega t) + I_{5m} \sin(5\omega t) + I_{7m} \sin(7\omega t) + I_{9m} \sin(9\omega t) & 300 \leq t \leq 450(c) \\ I_{1m} \sin(\omega t) & 450 \leq t \leq 600(c) \end{cases} \tag{7}$$

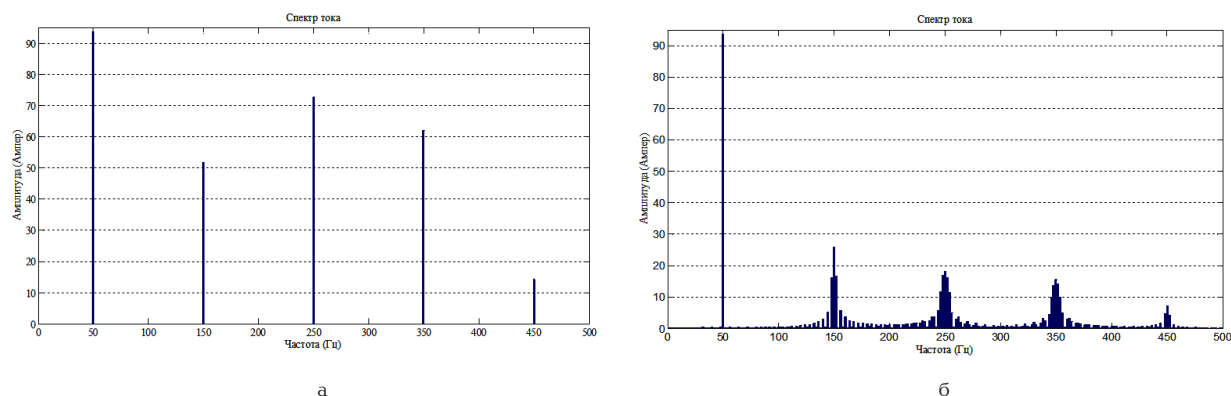


Рис. 4. Фурье-спектры сигнала тока: а — стационарного режима; б — нестационарного режима

В результате расчета режима получены следующие действующие значения токов ВГ (табл. 2).

Расчетным путем определяем токи на каждом интервале. Осциллограммы мгновенных значений тока на каждом интервале графика электрических нагрузок представлены на рис. 3.

Потери мощности в токоведущих частях (кабельной линии) могут быть определены как квадрат действующего значения тока на сопротивление токоведущей жилы:

$$\Delta P = 3R \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} \quad \text{или} \quad \Delta P = 3R \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n \frac{i_k^2(t)}{N}}, \quad (8)$$

где T — период.

Вторая формула применяется, если ток задан дискретными значениями.

Однако такой способ определения потерь можно применять, если известны интервалы времени, в течение которых действовал исследуемый сигнал, т.е. для исследования уже имеющихся осциллограмм.

Следовательно, такой способ не подходит для анализа сигнала в режиме реального времени.

При цифровой обработке сигналы представляются последовательностью чисел, т.е. дискретным рядом. Для работы с дискретными сигналами применяется дискретное преобразование Фурье (ДПФ; английский термин — Discrete Fourier Transform, DFT) [6, с. 251]:

$$I_n = \sum_{k=0}^{N-1} i_k e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}. \quad (9)$$

Фурье-спектры сигнала тока представлены на рис. 4.

Частота дискретизации сигнала (F_d) связана с количеством отсчетов (N) следующим соотношением:

$$F_d = \frac{N}{T}. \quad (10)$$

Для частотно-временной локализации широко применяется оконное преобразование Фурье. Использование оконной функции позволяет представить результат анализа — образ Фурье в виде двух переменных — частоты и времени положения окна l :

$$\tilde{I}(l, \omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} i(t)g(t-l)e^{-i\omega t} dt. \quad (11)$$

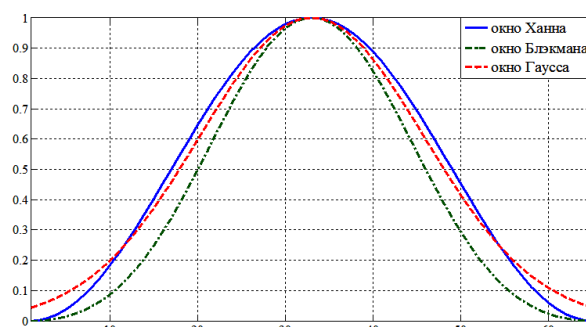


Рис. 5. Типы окон

«Для уменьшения растекания спектра при ДПФ применяются весовые функции (weighting functions), которые также называют *окнами* (window). В этом случае перед расчетом ДПФ сигнал умножается на весовую функцию $w(k)$, которая должна спадать к краям сегмента. Формула прямого ДПФ при использовании весовых функций принимает следующий вид [6, с. 272]:

$$I_n = \sum_{k=0}^{N-1} i_k g_k \exp(-j \frac{2\pi nk}{N}) \rangle. \quad (12)$$

Различные типы окон представлены на рис. 5.

В стационарном режиме для расчета потерь мощности и энергии в токоведущих частях необходимо исходную несинусоидальную кривую разложить на сумму синусоидальных с определенными значениями амплитуд гармоник и их начальных углов [7, с. 282].

Совокупность амплитуд I_{vm} и фаз ψ_v образует дискретные амплитудный и фазовый спектры. Для решения практических задач расчета потерь в элементах СЭС основное значение имеет амплитудный спектр частот [8, с. 8]. Потери активной мощности в токоведущих частях без учета эффекта вытеснения тока могут быть определены по формуле

$$\Delta P_{\Sigma v} = 3 \sum_{v=1}^n I_v^2 R. \quad (13)$$

Тогда потери энергии будут равны:

$$\Delta W_{\Sigma v} = 3 \sum_{v=1}^n I_v^2 R t. \quad (14)$$

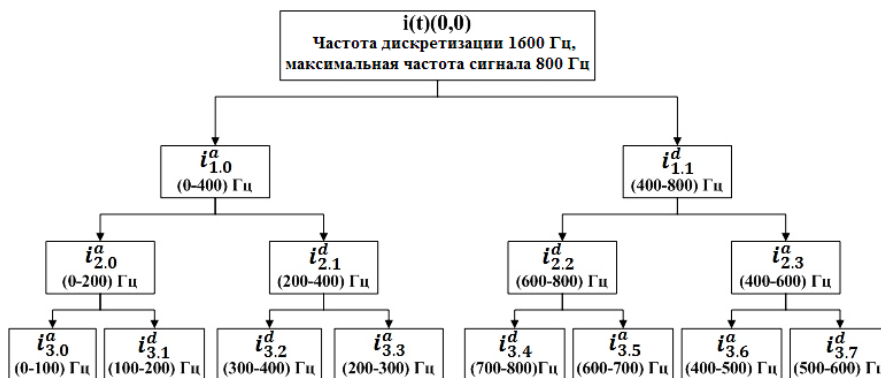


Рис. 6. Блок-схема дерева разложения сигнала

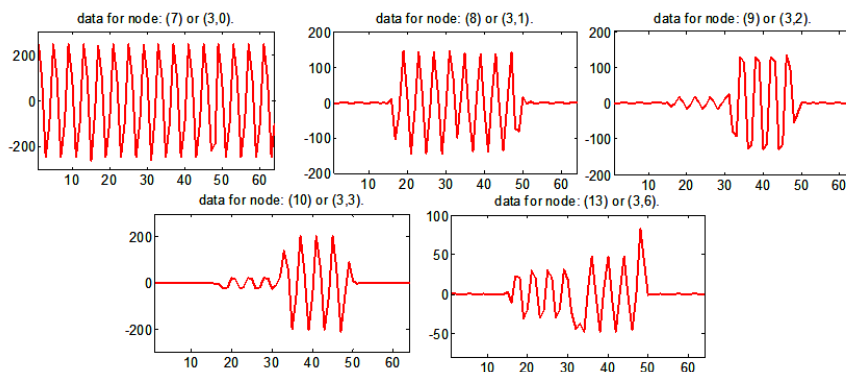


Рис. 7. Вейвлет-спектры коэффициентов

Таблица 3

Значения потерь энергии в кабельной линии, рассчитанных отдельно для каждой гармоники по формуле $\Delta W = 3I^2Rt$

ΔW_1 , кВт·ч	ΔW_3 , кВт·ч	ΔW_5 , кВт·ч	ΔW_7 , кВт·ч	ΔW_9 , кВт·ч
583720	89113	88002	64233	68099

Главным принципом пакетного вейвлет-разложения является рекурсивное определение последующих элементов более глубокого уровня разложения. Исходный сигнал (в нашем случае ток) умножается на коэффициенты фильтров высоких и низких частот, в результате чего получаются детализирующие и аппроксимирующие коэффициенты соответственно. Математически алгоритм, представленный на рис. 6, можно записать следующими выражениями [9]:

$$\psi_{j,k}^{2n}(t) = \sum_m h(m) \psi_{j-1,2k-m}^n(t), \quad (15)$$

$$\psi_{j,k}^{2n+1}(t) = \sum_m g(m) \psi_{j-1,2k-m}^n(t). \quad (16)$$

На основании главного свойства масштабирующей и вейвлет-функции — их скалярное произведение равно нулю — можно получить следующие равенства:

$$\int (\varphi_{j,k}(t))^2 dt = 1, \int \varphi_{j,k}(t) \psi_{j,k}^n(t) dt = 0, n \neq 0, \quad (17)$$

$$\int (\psi_{j,k}^n(t))^2 dt = 1, \int \psi_{j,k}^n(t) \psi_{j,l}^l(t) dt = 0, n \neq l. \quad (18)$$

Тогда коэффициенты пакетного вейвлет-преобразования — это результат свертки исходного сигнала на основе вейвлета:

$$d_j^{2n}(k) = \sum_m h(m) d_{j-1}^n(2k-m), \quad (19)$$

$$d_j^{2n+1}(k) = \sum_m g(m) d_{j-1}^n(2k-m). \quad (20)$$

Представленная на рис. 6 схема вейвлет-преобразования предполагает три уровня разложения $j = 3$.

Действующие значения тока для искомого частотного диапазона с учетом свойств вейвлет-преобразования (17), (18) могут быть получены:

$$I_{100-200} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k_m} i_{3,1}^{d_2}(k)}. \quad (21)$$

Из дерева разложения сигнала следует, что на каждом уровне декомпозиции происходит

Значения потерь энергии в кабельной линии, рассчитанных отдельно для каждой гармоники, при помощи пакетного вейвлет-разложения

ΔW_1 , кВт·ч	ΔW_3 , кВт·ч	ΔW_5 , кВт·ч	ΔW_7 , кВт·ч	ΔW_9 , кВт·ч
583570	89974	87091	64317	67044

Таблица 5

Значения погрешностей при определении потерь энергии

ε_1 , %	ε_3 , %	ε_5 , %	ε_7 , %	ε_9 , %
0,026	0,96	1,05	0,13	1,6

децимация (прореживание) сигнала — уменьшение частоты сигнала.

В результате пакетного вейвлет-разложения получаем матрицы вейвлет-коэффициентов (рис. 7), отвечающих за определенные диапазоны частот.

На завершающем этапе исследований были рассчитаны потери энергии в кабельной линии на основании вейвлет-коэффициентов. Результаты сопоставлялись с потерями, полученными в ходе расчета по действующим значениям тока за известный промежуток времени (табл. 3, 4). При этом погрешности в определении потерь очень малы (табл. 5). И поэтому с уверенностью можно сказать, что метод расчета на основании вейвлет-коэффициентов отлично справился с вычислением потерь энергии.

Библиографический список

- Петрова, Е. В. Расчет погрешностей определения потерь электрической энергии в проводах повышенной пропускной способности из-за неучета атмосферных и режимных факторов / Е. В. Петрова, А. Я. Бигун, В. Н. Горюнов, С. С. Гиршин, А. А. Бубенчиков // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 2 (120). — С. 191–197.
- Горюнов, В. Н. Расчет потерь мощности от влияния высших гармоник / В. Н. Горюнов, Д. С. Осипов, А. Г. Лютаревич // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2009. — № 2. — С. 268–273.
- Дед, А. В. Повышение точности расчета технологических потерь электрической энергии в ВЛ на основе учета режимных и климатических факторов / А. В. Дед, В. Н. Горюнов, С. С. Гиршин, А. А. Бубенчиков, А. С. Петров, Е. В. Петрова, В. В. Тевс // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 1 (87). — С. 114–119.
- Вырва, А. А. Уточнение формул для анализа температуры проводов ВЛ в задачах расчета потерь электрической энергии / А. А. Вырва, В. Н. Горюнов, С. С. Гиршин, А. А. Бубенчиков, А. С. Петров, Е. В. Петрова, В. В. Тевс // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 1 (87). — С. 127–132.
- Петрова, Е. В. Учет температурной зависимости сопротивления неизолированного провода при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности / Е. В. Петрова, С. С. Гиршин, В. Н. Горюнов, Д. Е. Христич // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2013. — № 1. — С. 284–291.
- Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. — СПб.: ПИТЕР, 2002. — 608 с.
- Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: рук. для практ. расчетов / Ю. С. Железко. — М.: ЭНАС, 2009. — 456 с.
- Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 331 с.
- Morsi W. G., El-Hawary M. E. Time-frequency single-phase power components measurements for harmonics and inter-harmonics distortion based on Wavelet Packet transform. Part I: Mathematical formulation // Electrical and Computer Engineering, Canadian Journal, Vol. 35, Winter 2010. — P. 1–7.

ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

КОВАЛЕНКО Дмитрий Валерьевич, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

КИСЕЛЁВ Богдан Юрьевич, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий. Адрес для переписки: Dmitrii_Kovalenko92@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31.03.2016 г.

© Д. С. Осипов, Д. В. Коваленко, Б. Ю. Киселёв